中国材料工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会




第20卷 材料塑性成形工程（上）




胡正寰 夏巨谌 主编



化学工业出版社

CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

参编学会

中国金属学会　中国化工学会　中国硅酸盐学会　中国有色金属学会　中国复合材料学会



第1卷　材料工程基础
主编：师昌绪　钟群鹏　李成功

第2卷　钢铁材料工程(上)
主编：干勇　田志凌　董瀚　冯涤　王新林

第3卷　钢铁材料工程(下)
主编：干勇　田志凌　董瀚　冯涤　王新林

第4卷　有色金属材料工程(上)
主编：黄伯云　李成功　石力开　邱冠周　左铁镛

第5卷　有色金属材料工程(下)
主编：黄伯云　李成功　石力开　邱冠周　左铁镛

第6卷　高分子材料工程(上)
主编：杨鸣波　唐志玉

第7卷　高分子材料工程(下)
主编：杨鸣波　唐志玉

第8卷　无机非金属材料工程(上)
主编：江东亮　李龙土　欧阳世翕　施剑林

第9卷　无机非金属材料工程(下)
主编：江东亮　李龙土　欧阳世翕　施剑林

第10卷　复合材料工程
主编：益小苏　杜善义　张立同

第11卷　信息功能材料工程(上)
主编：王占国　陈立泉　屠海令

第12卷　信息功能材料工程(中)
主编：王占国　陈立泉　屠海令

第13卷　信息功能材料工程(下)
主编：王占国　陈立泉　屠海令

第14卷　粉末冶金材料工程
主编：韩凤麟　马福康　曹勇家

第15卷　材料热处理工程
主编：樊东黎　潘健生　徐跃明　佟晓辉

第16卷　材料表面工程(上)
主编：徐滨士　刘世参

第17卷　材料表面工程(下)
主编：徐滨士　刘世参

第18卷　材料铸造成形工程(上)
主编：柳百成　黄天佑

第19卷　材料铸造成形工程(下)
主编：柳百成　黄天佑

■ 第20卷　材料塑性成形工程(上)
主编：胡正寰　夏巨谌

第21卷　材料塑性成形工程(下)
主编：胡正寰　夏巨谌

第22卷　材料焊接工程(上)
主编：史耀武

第23卷　材料焊接工程(下)
主编：史耀武

第24卷　材料特种加工成形工程(上)
主编：王至尧

第25卷　材料特种加工成形工程(下)
主编：王至尧

第26卷　材料表征与检测技术
主编：徐祖耀　黄本立　鄢国强



ISBN 7-5025-7322-4
定价：135.00元

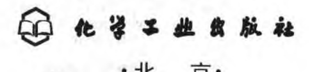
中国材料工程大典

中国机械工程学会　中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

第20卷　材料塑性成形工程（上）

胡正寰　夏巨谌　主编



化学工业出版社

·北　京·

（京）新登字 039 号

内容简介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国 39 位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写，全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果，集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容，涵盖了材料工程的各个领域，将最新的实用数据（特别是与国际接轨的标准数据）、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来，并附应用实例，充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材，合理用材，应用先进的材料成形加工技术，提高产品质量和性能，降低产品成本，增强产品市场竞争力的需要，而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新，促进制造业的发展，提高我国制造业的竞争能力，具有重要的现实意义。

本书为第 20 卷，材料塑性成形工程（上）。主要内容包括锻造成形、板料冲压成形、板型管轧制成形等。

本书主要供具有大专以上文化水平，从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料塑性成形工程的各类技术问题时使用，起备查、提示和启发的作用，也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国材料工程大典．第 20 卷，材料塑性成形工程．上/胡正寰，夏巨谌主编．—北京：化学工业出版社，2005.8
ISBN 7-5025-7322-4

Ⅰ．中… Ⅱ．①胡…②夏… Ⅲ．①材料科学②金属材料—塑性变形 Ⅳ．①TB3②TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 094422 号

中国材料工程大典
第 20 卷
材料塑性成形工程（上）
中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会
胡正寰　夏巨谌　主编
责任编辑：周国庆　陈志良　李骏带
责任校对：顾淑云
封面设计：雷嘉琦

*

化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里 3 号　邮政编码：100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn

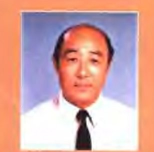
*

新华书店北京发行所经销
北京蓝海印刷有限公司印装
开本 880mm × 1230mm 1/16　印张 44 ¼　字数 2065 千字
2006 年 1 月第 1 版　2006 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7 – 5025 – 7322 – 4
定价：135.00 元

中国材料工程大典编委会



主任：路甬祥



常务副主任：李成功



总策划：宋天虎





总策划：黄远东



总编辑：李骏带



中国材料工程大典编委会

杨　合（西北工业大学教授）
杨　武（上海材料研究所教授）
杨乃宾（北京航空航天大学教授）
杨才福（钢铁研究总院教授）
杨鸣波（四川大学教授）
杨忠民（钢铁研究总院教授）
杨晓华（福州大学教授）
杨海波（北京科技大学教授）
杨焕文（中国有色金属学会副秘书长，教授）
杨德仁（浙江大学教授）
李　强（福州大学教授）
李　晋（上海材料研究所教授）
李　楠（武汉科技大学教授）
李长久（西安交通大学教授）
李龙土（清华大学教授、院士）
李成功（中国材料研究学会荣誉理事，教授）
李光福（上海材料研究所教授）
李志刚（华中科技大学教授）
李明哲（吉林大学教授）
李明辉（上海交通大学教授）
李学勇（科学技术部副部长）
李虹霞（洛阳耐火材料研究院教授）
李恒德（清华大学教授、院士）
李贺军（西北工业大学教授）
李海军（宁夏东方钽业股份有限公司高级工程师）
李骏带（中国材料工程大典编委会高级工程师）
李鹤林（石油天然气公司管材研究所教授、院士）
严东生（中科院上海硅酸盐研究所教授、院士）
连克仁（苏州特种加工研究所教授）
肖亚庆（中国铝业公司总经理，教授）
吴　行（装甲兵工程学院教授）
吴　昆（哈尔滨工业大学教授）
吴　诚（上海材料研究所教授）
吴永声（四川大学教授）
吴伟仁（国防科工委科技与质量司司长、研究员）
吴性良（复旦大学教授）
吴科如（同济大学教授）
吴恩熙（中南大学教授）
吴谊群（中科院上海光学机械研究所研究员）
吴智华（四川大学教授）
吴德馨（中科院微电子所研究员、院士）
何光远（原机械工业部部长、教授）
何季麟（宁夏东方有色金属集团公司总裁，院士）
佟晓辉（中国热处理行业协会研究员）
邱　勇（清华大学教授）
邱冠周（中南大学副校长、教授）
邱德仁（复旦大学教授）
余金中（中科院半导体研究所研究员）
邹广田（吉林大学教授、院士）
汪明朴（中南大学教授）
沈　真（中航一集团623所研究员）
沈万慈（清华大学教授）
沈德忠（清华大学教授、院士）
宋天虎（中国机械工程学会秘书长，教授）
张　力（国防科工委经济与协调司副司长、研究员）
张　扬（四川大学教授）
张　华（贵州安大航空锻造公司副总经理）
张　杰（北京科技大学教授）
张　金（中国锻压协会秘书长、教授）
张　峥（北京航空航天大学教授）
张子龙（北京航空材料研究院高级工程师）
张用宾（中国建筑材料科学研究院教授）
张立同（西北工业大学教授、院士）
张永俐（昆明贵金属研究所教授）
张吉龙（中国铝业公司教授）
张旭初（中国材料工程大典编委会教授）
张佐光（北京航空航天大学教授）
张晋远（钢铁研究总院教授）
张康侯（昆明贵金属研究所教授）
张道中（中科院物理研究所教授）
张新民（中南大学教授）
陆燕荪（原机械工业部副部长）
陈　琦（沈阳铸造研究所教授）
陈文哲（福州大学教授）
陈世朴（上海交通大学教授）
陈立泉（中科院物理研究所教授、院士）
陈运远（上海材料研究所教授）
陈志良（化学工业出版社编审）
陈国钧（钢铁研究总院教授）
陈治明（西安理工大学校长、教授）
陈南宁（北京钢铁设计研究总院教授）
陈祝年（山东大学教授）
陈晓慈（中国第二重型机械集团公司副总工程师）
陈涌海（中科院半导体研究所研究员）
陈祥宝（北京航空材料研究院研究员）
陈超志（中国机械工程学会高级工程师）
林慧国（钢铁研究总院教授）
欧阳世翕（中国建筑材料科学研究院教授）
卓尚军（中科院上海硅酸盐研究所研究员）
易建宏（中南大学教授）
罗祥林（四川大学教授）
罗豪甦（中科院上海硅酸盐研究所教授）
果世驹（北京科技大学教授）
周　廉（西北有色金属研究院教授，院士）
周伟斌（化学工业出版社副社长，编审）
周国庆（化学工业出版社副总编辑、编审）
郑有炓（南京大学教授、院士）
柳玉起（华中科技大学教授）

柳百成（清华大学教授，院士）
胡玉亭（太原钢铁集团公司总工程师，教授）
胡正寰（北京科技大学教授、院士）
南策文（清华大学教授）
赵万生（哈尔滨工业大学教授）
赵有文（中科院半导体研究所研究员）
赵国群（山东大学教授）
赵金榜（上海市涂料研究所教授）
赵梓森（武汉邮电科学研究院研究员、院士）
赵慕岳（中南大学教授）
钟群鹏（北京航空航天大学教授、院士）
施东成（北京科技大学教授）
施剑林（中科院上海硅酸盐研究所教授）
姜不居（清华大学教授）
姜晓霞（中科院金属研究所研究员）
祖荣祥（钢铁研究总院教授）
姚燕（中国建筑材料科学研究院院长，教授）
贺宁华（国防科工委经济与协调司处长）
耿林（哈尔滨工业大学教授）
聂大钧（宁夏东方有色金属集团公司教授）
贾成厂（北京科技大学教授）
顾冬红（中科院上海光学机械研究所研究员）
夏巨谌（华中科技大学教授）
夏志华（北京有色金属研究总院教授）
俸培宗（化学工业出版社社长、编审）
徐匡迪（中国工程院院长、院士）
徐廷献（天津大学教授）
徐建军（四川大学教授）
徐祖耀（上海交通大学教授、院士）
徐家文（南京航空航天大学教授）
徐跃明（中国机械工程学会热处理学会研究员）
徐滨士（装甲兵工程学院教授、院士）
殷树言（北京工业大学教授）
翁宇庆（中国金属学会理事长、教授）
郭会光（太原重机学院教授）
郭景杰（哈尔滨工业大学教授）
高瑞萍（国家自然科学基金委员会研究员）
栾恩杰（国防科工委专家咨询委主任、研究员）
唐仁政（中南大学教授）
唐汝钧（上海材料研究所教授）
唐志玉（四川大学教授）
唐昌世（首都钢铁集团公司教授）
益小苏（北京航空材料研究院教授）
涂善东（南京工业大学教授）
黄勇（清华大学教授）
黄天佑（清华大学教授）
黄玉东（哈尔滨工业大学教授）
黄本立（厦门大学教授、院士）
黄远东（中国材料工程大典编委会高级工程师）
黄伯云（中南大学校长，院士）
黄校先（中科院上海硅酸盐研究所教授）
黄培云（中南大学教授、院士）
曹勇家（钢铁研究总院教授）
曹湘洪（中国石油化工股份有限公司董事、院士）
龚七一（中国化工学会秘书长、教授）
崔健（上海宝钢集团公司副总经理，教授）
康喜范（钢铁研究总院教授）
梁齐（上海交通大学教授）
梁军（哈尔滨工业大学教授）
梁志杰（装甲兵工程学院高级工程师）
屠海令（北京有色金属研究总院院长，教授）
隋同波（中国建筑材料科学研究院教授）
韩凤麟（中机协粉末冶金分会教授）
彭艳萍（国防科工委科技与质量司高级工程师）
葛子干（北京航空材料研究院院长、教授）
董瀚（钢铁研究总院教授）
董汉山（英国伯明翰大学教授）
董首山（中科院金属研究所研究员）
董祖珏（机械科学研究院教授）
董湘怀（上海交通大学教授）
蒋力培（北京石油化工学院教授）
蒋建平（浙江大学教授）
傅绍云（中科院理化技术研究所研究员）
储君浩（上海技术物理研究所教授）
谢邦互（四川大学教授）
谢里阳（东北大学教授）
谢建新（北京科技大学副校长、教授）
鄢国强（上海材料研究所教授）
雷天民（西安理工大学教授）
路甬祥（中国机械工程学会理事长、院士）
解应龙（哈尔滨焊接技术培训中心教授）
解思深（中科院物理研究所教授、院士）
雍岐龙（钢铁研究总院教授）
蔡中义（吉林大学教授）
漆玄（上海交通大学教授）
谭抚（中国硅酸盐学会副秘书长、教授）
熊守美（清华大学教授）
薪常青（中科院物理研究所教授）
樊东黎（中国热处理行业协会教授）
黎文献（中南大学教授）
颜永年（清华大学教授）
颜鸣皋（北京航空材料研究院教授、院士）
潘正安（化学工业出版社总编辑、编审）
潘叶金（中南大学教授）
潘振甦（中科院上海硅酸盐研究所教授）
潘健生（上海交通大学教授、院士）
燕瑛（中国复合材料学会秘书长、教授）
戴国强（科学技术部高新司副司长）

鸣　　谢

在编写过程中，得到以下部门和单位的支持和协作，使《中国材料工程大典》得以顺利编撰完成。在此，中国材料工程大典编委会代表全体作者表示衷心感谢！

支持部门：中华人民共和国料学技术部
国防科学技术工业委员会
国家自然料学基会委员会
中国料学技术协会
中国科学院
中国工程院

协 作 单 位

钢铁研究总院
北京有色金属研究总院
北京航空材料研究院
中国建筑材料料学研究院
中国科学院金属研究所
中国科学院上海硅酸盐研究所
上海宝钢集团公司
中国石油化工集团公司
中国铝业公司
清华大学
中南大学
大原钢铁集团公司
西北有色金属研究院
宁夏东方有色金属集团公司
华中科技大学
中国第二重型机械集团公司
北京科技大学
北京航空航天大学
中国航天集团第703研究所
中国持种设备检测研究中心
哈尔滨工业大学
贵州安大航空锻造公司
东北大学
西安重型机械研究所
中国科学院半导体研究所
四川大学
北京航空制造工程研究所
中国料学院物理研究所
西北工业大学
北京矿冶研究总院
沈阳铸造研究所
江苏法尔胜公司

序

材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入21世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的1/3以上，约占会国工业生产的4/5，为国家财政提供1/3以上的收入，占出口总额的90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学全和中国材料研究学会牵头，会同中国会属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为料技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过5年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共26卷约7000万字的巨著，是39位两院院士和1200余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了键康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导政眼睛视网膜膜落……。这种敬业精神与坚强教力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国破酸盐学会、中国有色全属学会、中国复合材料学会的支持。达些学会的众多专家教授积授参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学全和中国材料研究学会的专家教授一起完成达项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员全、国家自然科学基全委员会、中国科学技术协会、中国料学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积提帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的版切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的料研院所、院技、金业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顾利出版。

《材料大典》既总结了10多年来在材料工程方面的最新教据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了料学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院技的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任

2005年9月23日

前　言

《材料塑性成形工程》是《中国材料工程大典》中的卷目之一。

材料塑性成形加工行业是制造行业的主要组成部分，对国民经济的发展有重要作用。材料的锻造与冲压，是汽车、飞机、造船、军工、钢铁、电力工程、农机、家电、装备制造业等支柱产业，也是当代材料工程和先进制造技术的重要内容。中国已成为世界锻件和冲压件生产的第一大国，2004 年锻件与冲压件产量已达到 2000 多万吨。但同时也面临着对锻件与冲压件生产的技术水平、质量、能耗、环保等方面的严峻挑战。中国的锻造与冲压工业要向世界先进水平看齐，变“锻造大国”为“锻造强国”，这也是我国广大从事塑性成形技术与生产的工作者所面临的紧迫而艰巨的任务。《中国材料工程大典》中的《材料塑性成形工程》卷的编写和出版，正好适应了这种形势发展的需要。

《材料塑性成形工程》卷（上下册）是我国迄今为止覆盖面最宽、内容最新的材料塑性成形专业工具书。内容包括概论、锻造成形、板料冲压成形、板型管轧制成形、零件轧制成形、特种锻造成形、板管料种成形，型材挤压成形、塑性成形 CAD/CAM 和塑性成形质量控制与检测等 10 篇约 400 万字。参加这部著作编写的胡正寰和夏巨谌统稿合成。参加的主要单位有北京科技大学、华中科技大学、长春一汽锻造有限公司、东风汽车公司锻造厂、湖北汽车集团公司、哈尔滨工业大学、吉林大学、西北工业大学、武汉理工大学、太原重机学院、南昌大学、南昌航空工业学院等。历时 3 年多完成编写工作。

各篇的主编如下：

第 1 篇	概论	夏巨谌	张　金		
第 2 篇	锻造成形	夏巨谌	郭会光		
第 3 篇	板料冲压成形	杨　合	华　林	刘郁丽	
第 4 篇	板型管轧制成形	张　杰	杨海波	施东成	陈南宁
第 5 篇	零件轧制成形	胡正寰	华　林		
第 6 篇	特种锻造	王高潮			
第 7 篇	板管料种成形	李明哲	蔡中义		
第 8 篇	型材挤压成形	夏巨谌	闫　洪		
第 9 篇	塑性成形CAD/CAM	李志刚			
第 10 篇	塑性成形质量控制与检测	吕　炎			

本书在整体设计上是“立足全局，反映共性，突出重点，实用便查”。在具体编写上是以材料的塑性成形工艺为主，以工模具设计及关键设备的应用为辅；以目前生产中普遍使用的锻造与冲压工艺及主要的模具设计方法为基础，向塑性成形新工艺新模具及新设备延伸。本书全面系统地反映了我国塑性成形技术的发展及取得的成就和经验，介绍了国内外的先进塑性成形技术，具有“科学性，先进性和实用性。”本书主要供从事制造业和材料工程的科学技术人员使用，也可以供研究人员，管理人员和高等院校师生参考。

感谢中国机械工程学会、中国材料研究学会和中国材料工程大典编委会对《材料塑性成形工程》卷编写工作的指导与大力支持。由于编写时间紧迫和编者水平所限，书中难免有疏漏与不当之处，敬请读者指正并提出宝贵意见。

胡正寰　夏巨谌

2005 年 9 月 9 日

目　录

第1篇

概　论

主　编　夏巨谌　张　金

编　写　夏巨谌

审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



材料塑性成形加工工业是机械制造工业的重要组成，精密塑性成形技术是先进制造技术的重要组织部分。可以认为，塑性成形技术是现代工业生产技术的支柱，其生产能力和工艺水平，对一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的高度，影响很大。

1 材料塑性成形的特点

材料在外力作用下产生永久性变形而不破坏其完整性的变形称为塑性变形。本卷则主要是论述金属材料的塑性变形。

金属塑性成形技术是金属加工方法之一。它是利用金属的塑性——金属产生塑性变形的能力，使金属在外力作用下成形的一种加工方法。因而也称为金属塑性加工或金属压力加工。

工业中常见的金属加工方法，如轧制、挤压、拉拔、锻造、冲压等，都是利用金属的塑性而得以实现的。通常，轧制、拉拔、挤压是生产型材、板材、管材和线材等金属材料的加工方法，属于冶金工业领域；而锻造、冲压则是利用这些金属材料来制造机器零件的加工方法，故属机械制造工业领域。但是这种区分方法也不是绝对的，例如有的冶金工厂中也利用锻造来生产棒材，有的机器制造厂也利用轧和挤的变形方式来生产机器零件。本卷则着重论述机械制造领域内的塑性成形方法。

金属塑性成形方法由于在技术上和经济上有独特之处，因而是国民经济中不可缺少的重要加工手段。它的主要优点有：

1) 产品性能好　金属材料经过相应的塑性加工后，其组织、性能都可得到改善和提高，特别是对于铸造组织的改善，效果更为显著。例如，铸锭要通过锻造或者轧制，或者挤压，才能使结构致密，组织改善，成为合用的材料。当用这些材料为原毛坯，通过塑性成形工艺生产零件毛坯或零件成品时，因金属材料沿零件的轮廓形状分布，金属纤维连续，加上材料在外力作用下处于三向压应力或以压应力为主的应力状态下成形，有利于提高材料的成形性能和材料的“结实”程度。其综合效果是有利于进一步提高零件产品的力学性能，如强度、冲击韧度和抗疲劳寿命等。以圆锥齿轮为例，采用精锻工艺生产的齿轮，同采用切削加工生产的相比，其强度提高20%，而热处理变形降低了30%。因此，一般说来，凡是承受交变载荷，服役条件比较繁重的零件，采用塑性成形方法制造的比较可靠。

2) 材料利用率高　金属塑性成形是金属在固态下体积的转移过程，因此，在成形过程中，不像切削加工那样产生切屑，所以是一种少无切屑成形方法。以常见的圆锥齿轮和汽车轮胎螺母为例，当采用棒材作原始毛坯通过切削加工生产时，其材料利用率分别为41%、37%；当采用普通模锻工艺生产相应的锻件毛坯，然后通过切削加工获得零件成品时，其材料利用率分别为68%、72%；当分别采用精密模锻和挤压工艺生产时，相应的材料利用率为83%、92%。

3) 产品尺寸精度较高，表面粗糙度较低，形状和尺寸规格的一致性好　塑性成形，除自由锻造工艺外，模锻、挤压、轧制成形、摆辗、冲裁、弯曲、拉深、旋压及各种特种成形工艺，均为坯料金属通过模具或专用装置在机器的外力作用下成形为所需工件即产品，工件的形状和尺寸均由模具来确定，因此，产品尺寸精度较高，表面粗糙度较低，其形状和尺寸规格的一致性好。而采用精密模锻、冷挤压和精密冲裁等精密成形工艺，所得工件的一致性更好，其尺寸精度、表面粗糙度完全可达到切削加工中的磨削加工的水平。例如，闭式精锻的圆锥齿轮，其齿形误差只有0.02 mm（取代刨齿和滚齿加工），精度达IT7级，可满足现代轿车的要求。冷锻件直径公差可达0.02 mm，厚度公差在0.10 mm以内，同心度误差小于0.05 mm。又如，精冲制件的尺寸公差在0.01 mm之内，表面粗糙度为R_a2.5～0.63 μm；对于板材抗拉强度至600 MPa，厚度为1～4 mm的精冲件，其尺寸精度达IT7级。

4) 劳动生产率高　如上所述，对于零件毛坯或零件成品，当采用塑性成形工艺来生产时，一般都以模具为主要的工装；加上普遍采用机械化、自动化流水作业实现大批量乃至大规模生产，可以达到很高的生产率。例如，在120 MN热模锻压力机上生产汽车发动机六拐曲轴模锻件，仅需40秒钟；采用自动冷镦机生产M12螺栓和螺母，其生产率分别为每分钟210件和150件；采用闭式锻造压力机，同时配上自动化生产线，每分钟即可生产圆锥齿轮精密锻件20件。又如，现代高速冲床，一般在400次/min以上，最快可达1 000次/min以上。

由此可见，利用金属塑性成形方法不但能获得强度高、性能好的工件，而且具有生产效率高、材料消耗少、减少环境污染等优点。

2 材料塑性成形在国民经济中的地位和作用

材料塑性成形工艺在汽车、拖拉机与农业机械、机床、航空航天、兵器、舰船、工程机械、起重机械、动力机械、石油化工机械、冶金机械、仪器仪表、轻工、家用电器和信息产业等制造业中，起着极为重要的作用。它是实现这些行业中的自由锻件与模锻件、挤压件、普通冲压件及精冲元件、管件与型材、特种成形件等生产的主要方式和方法。

采用塑性成形加工的零件与制品，在汽车与摩托车制造中，其比例占70%～80%；在拖拉机及农业机械中约占50%；在航空航天飞行器中占50%～60%；在仪表中高达90%；在家用电器中包含采用塑性成形加工的塑料件在内高达90%～95%；在工程与动力机械中也占20%～40%。

以载重汽车为例，一辆汽车由数十个乃至上百个部件上万个零件组装而成。其中，采用模锻工艺生产的发动机关键零件有连杆、曲轴、气门、凸轮轴等；传动轴系的关键零件有万向节叉、滑动叉、凸缘叉、十字轴和花键轴等；底盘上的关键零件有前梁、左右半轴、左右转向节、左右制动凸轮等；各种齿轮锻20余种。一辆EQ240载重车需要锻件125种，近270件。车身上所需的大型板料冲压件有驾驶室顶棚、车门、前盖板、后围板、侧围板、底板、车箱、仪表板等；底盘上的大型冲压件有大梁、横梁、保险杠、油箱等；车轮上的钢圈与轮毂等。各种钣金件的品种和数量比锻件的还多。轿车上的薄板件其品种和数量更多。

常规兵器中的枪、炮、坦克等的关键零部件大量采用锻造工艺生产；子弹和炮弹主要采用变薄拉延与挤压工艺生产；飞机、火箭与导弹外壳主要用板料成形工艺生产等等。

近20余年来，工业发达国家不仅用其锻件产量来衡量锻造工业的发展水平，而且也用来衡量制造业的发展水平。通常认为，一个钢产量为千万吨计的国家，各类锻年总重量则应以百万吨计。例如，前苏联钢的年产量达到4 500万吨的时候，各类锻件总重量为350万吨，约占钢产量的8%；美国、日本和德国为8%以上。

据统计，1997年我国锻件总重量为253万吨，近年来逐年增加，相对我国原有的锻造工业的薄弱基础进步巨大，但因我国钢产量超过亿吨，为世界各国钢产量之首，其锻件产量所占比例与发达国家相比，存在较大差距。这表明，我国的锻造工业乃至整个塑性成形加工工业存在着巨大的发展空间，尤其是，随着我国汽车工业、能源动力机械、航空航天和造船工业的迅速发展，材料塑性成形技术的地位和作用将更加凸显出来。



3 中国塑性成形加工技术发展概况及成就

3.1 古代塑性成形加工技术概况

体积金属的锻造技术和板料金属的冲压技术是金属材料塑性成形加工技术的主体。下面着重阐述这两种塑性成形技术的发展概况及所取得的成就。

世界上锻造技术起源于何时，无从考证。但中国是世界上应用最早的国家之一。从1972年河北藁城县商代遗址出土的兵器考证，距今已有3 300余年，经采用现代技术检验，其刃口是采用合金嵌锻而成，这是我国至今发现最早生产的锻件。另外，在陕西秦始皇兵马俑坑的出土文物中，有三把合金钢锻制的宝剑，其中一把至今仍光艳夺目、锋利始昔，令目睹者叹为观止。

冲压工艺源自于金属手工艺品的制作。在我国河北省怀来县北辛堡出土的战国早期（公元前475~221年）生产的红铜錐胎薄钢缶（音否，小口大腹的盛酒器），被学者认为是至今为止发现的世界第一个冲压制品。此缶壁厚仅1 mm左右，而且厚薄十分均匀。它分为上下两部分，加工成形后，再用冷咬接技术套接在一起，器身还有精细而流畅的针刻文。

从2 000~3 000多年前的兵器刃口的合金钢锻制工艺和精美绝纶的器皿制作工艺表明，其制作年代之早、技术杂复程度之高，都证明了我国古代劳动人民在锻造成形和钣金成形方面的勤劳智慧和领先地位与水平。

3.2 建国以来前30余年的发展概况及成就

我国的锻造和钣金生产虽然历史悠久，但长期处于手工生产状态。由于长期的封建社会，不少统治者将科学技术与发明创造视为雕虫小技，形成鄙薄科学技术的传统陋习，造成锻压技术与其他科学技术领域的命运一样，得不到发展。近百年来，我国又受帝国主义列强的疯狂侵略和肆意掠夺，加上清朝以及后来的国民党当局的腐败统治，极大地阻碍了社会生产力和科学技术的发展。直到1949年新中国成立，我国的锻压工业随着机械制造业的发展而同步壮大起来。

1）大型自由锻　20世纪50年代末至60年代初，在原机械工业部总工程师林宗棠的主持下，上海江南造船厂制造了我国第一台10 000 t水压机，使我国成为世界上继前苏联和美国等国家之后具备生产大型自由锻件能力的国家之一。至90年代初，我国拥有自由锻水压机并能生产大型锻件的锻遗厂有45家，其中800 t以上的水压机有65台份，6 000 t以上的7台份，总的生产能力超过700 000 t。能够生产诸如320 000 kW水力发电机组、600 000 kW大型火力发电机组、4.2 m特厚轧板机、30 000 t模锻水压机、12 500 t自由锻水压机、8 000 t热模压力机、5 000 t级舰船轴系等大型关键产品的大锻件。

2）汽车模锻与冲压　20世纪50年代中期伴随着长春第一汽车制造厂的建立，标志着我国现代化锻造与冲压生产的起步。70年代初期，在湖北十堰建设了东风汽车公司，通过引进热模锻压力机与国产锻造设备相结合，组建了多条机械化自动化模锻件生产线和机组，使我国汽车模锻件的生产接近当时的国际先进水平；以国产大中型冲压设备为主、进口冲压设备为辅，使我国的载重汽车冲压件的生产取得了较大进步。

3）精密模锻　20世纪60年代起，我国对多种少无切屑新工艺和特种成形工艺逐步开展了研究。60年代初，主要开展了锥齿轮和叶片精锻技术的研究，1970年上海机械工艺研究所和上海齿轮厂合作，率先对美国道奇T234汽车差速器行星齿轮进行热精锻工艺试验，1972年试验成功，1973年建立了精锻车间组织批量生产。1990年机械电子工业部科技司将热精锻直齿圆锥齿轮列为国家重点节能节材工艺推广项目，形成了一定的生产能力。其中，上海汽车齿轮总厂二分厂、姜堰市精锻齿轮厂等发展较为突出。热精锻齿轮一般为9级精度，少数达8~9级，材料利用率为76%。开始主要用于船用挂浆机、拖拉机和农用汽车的驱动桥差速器直齿锥齿轮。后来逐步应用于轻型车和中型卡车的驱动桥。80年代中后期，武汉机械工艺研究所等单位试验成汽车同步器齿环的精锻技术，并成立专门的公司，形成了大批量生产。700 mm不锈钢叶片，由北京机电研究所、华中工学院和东方汽轮机厂合作，研究成天然气环形转底式少氧化加热炉加热、精密辊锻制坯、摩擦压力机上终锻成形，使叶片锻件的质量和尺寸精度达到当时国外同类锻件的水平。

4）冷挤压　20世纪60年代中期，华中科技大学（原华中工学院）、上海交通大学等率先开展冷挤工艺研究，至70年代中期，低碳钢和中碳钢的冷挤压工艺在汽车、拖拉机、标准件、轻工、仪表等行业得到应用，其中一个典型实例就是汽车轮胎螺母的冷挤压，东风汽车公司标准件建厂时，原打算引进德国的热挤压生产线，后来采用华中工学院同武汉汽车标准厂共同研究并已成功应用的正反复合冷挤压工艺，建立了生产线，不仅节省了设备投资，而且产品质量更高。

5）辊锻　自20世纪80年代初起，吉林工业大学对形状复杂的长轴类锻件成形辊锻金属流动规律、辊锻模型槽约束区内金属前滑等问题进行了研究，首先成功地完成了连杆的成形辊锻。然后同谷城汽车配件厂（现谷城车桥有限公司）一起在国内建立了首条汽车前梁成形辊锻生产线。90年代，谷城车桥公司通过试验和生产实践，不断改进和完善成形辊锻技术，使前梁的成形辊锻工艺逐渐趋于稳定，并新建两条前梁辊锻生产线，使前梁锻件的年产量超过10万件。2001~2002年，该厂同北京机电研究所协作，采用成形辊锻预成形，螺旋压力机整体模锻和弯曲成形工艺，建立了辊锻机→2 500 t高能螺旋压力机→1 000 t切边机的机械化生产线，较为成功地控制了前梁锻件长度尺寸的精度和质量，使该厂前梁锻件的年产量总共可达40万件。该项技术为我国独创的汽车前梁锻件工艺方法。

6）楔横轧　自20世纪70年代初起，北京科技大学（原北京钢铁学院）胡正寰院士及其所领导的科研组，致力于楔横轧技术的研究，先后研究成功了以带密集凸轮轴为典型件的轴类件楔横轧工艺，以拖拉机变箱轴为典型件的多楔轧制工艺，以钢球为典型件的孔型斜轧工艺，以汽车双联、四联齿轮坯、尾研、吊环及摇臂为典型件的斜轧制坯-横锻成形工艺。

7）闭式模锻　20世纪80年代，华中科技大学、北京机电研究所等对异形枝叉类零件和多孔类零件的多面模锻，可分凹模模锻和闭式模锻进行了研究。提出了分流降压腔的设置原则，并归纳出不同类型的零件进行闭式模锻时，其分流降压腔的设计与计算方法以及成形力的计算公式。解决了闭式模锻中坯料体积不可能与模膛体积严格相等的矛盾，避免了模膛压力过分升高而影响模具的寿命问题。先后开发出管接头及小型阀体的多向模锻、十字轴及三销轴的径向挤压、万向节叉及滑动叉的正向分流挤压模锻和大长径比轴杆零件闭式聚料成形等。在国内汽车零部件制造行业内推广应用，平均提高材料利用率25%~30%。至90年代，又研制成HYD－Y61-400/600及Y28-400/400双动挤压液压机和多连杆闭式锻造压力机，填补了我国闭式模锻压力机的空白。

8）摆动辗压　20世纪70~80年代，国内形成了近30余个高校、院所及厂家参加的庞大科研队伍从事摆辗工艺、理论和设备的研究工作、对其成形规律、变形机理、摆头运



动轨迹和送进量的确定原则等作了大量的分析研究，研制出多种锻造摆辗机。其中立式摆辗机是国内常见的，主要用于饼盘类锻件的加工；卧式摆辗机则主要用于汽车半轴类锻件的生产。此外，还有用于加工双联齿轮、局部成形的专用摆辗机和摆辗铆接机。采用摆辗工艺实现了汽车和拖拉机后半轴、被动大齿轮坯、碟形弹簧、离合器盘和高速钢刀片等。

9）旋压工艺 20世纪50年代，在航空、电器、日用品等的生产中已开始采用手工操作赶棒的普通旋压工艺生产一些制件，技术上进展不大。60年代初由变薄旋压到普通旋压，由军品到民品，旋压设备由液压到数控、由通用到专用。1963年起，航空部625所及有色金属研究总院率先开发出歼击机副油箱罩及无缝铜管。至80年代末，其研究与应用单位已超过100家。产品有飞机头及桨帽、喷气发动机及火焰筒、导弹与火箭弹壳体、喷管及药形罩、化工罐体、矿用支柱，而最广泛应用的是灯具、水壶等民品。北京航院开发了带轮旋压装置，哈尔滨工业大学与哈汽配及辽阳容器厂通过对引进设备的消化吸收创制出国内第一套4 500×25及国内最大的5 200×32二步法无胎封头成形设备。

10）精密冲裁 20世纪70年代中期，原电子工业部武汉长江有线电厂在华中工学院的协作下，研制了带齿圈压板和反向施压凸模的液压模架，将普通开式冲床改造为可进行精密冲裁的压力机，设计制造了各种精冲模具，开发出数十种零件的精冲工艺。北京机电研究所自70年代中起至今投入了大量的技术力量，在精冲基础理论、精冲压工艺、模具设计和制造、精冲压力机等方面进行了全面系统的研究，开发出多种精冲产品并在产业化方面取得丰硕成果。其中，所开发的捷达变速箱拨叉上的两个精冲零件，将精冲同挤压及多种普通冲压工序进行复合，扩大了精冲工艺的应用范围。

11）爆炸成形 自20世纪60年代中后期开始，对爆炸成形工艺就进行了研究，经过相关单位的科技人员的努力，创造了不少的新工艺、新方法。在成形拉深件、胀形件和其他钣金零件方面，取得了比较成熟的经验。就封头而言，已能加工出符合公差要求，最大直径为3 m左右，最大厚度为40～50 mm的产品；对于半球类深拉深零件，其变薄量不超过9%；对子直径为600～700 mm的胀形件，尺寸公差可控制在0.32 mm以下；制成的最薄零件厚度仅0.08 mm；最小零件直径只有十几毫米，最大平板件达5 m×1.6 m。另外，实现了不同金属，不同零件的相互焊接。

此外，还对板料的液压成形、电磁成形、管料胀形等板管特种成形工艺和一些特种锻造成形工艺都有研究，并取得了技术成果和生产应用。

3.3 改革开放20余年的发展概况及成就

改革开放以来，我国的锻造行业与冲压行业快速、持续、稳定地发展。全国锻造行业的厂点10 000余家，其中，骨干企业350多家，中外合资20余家，从业人员20余万，专业技术人员12 000多人。根据调查和测算，全国2000年锻件总产量为263万吨，其中模锻件165万吨。全世界锻件年产量约为1 450万吨，我国约占世界锻件总产量的25%，居世界第一。

3.3.1 锻压设备

（1）锻造设备

自20世纪80年代以来，锻造设备进入了一个新的发展时期，我国不仅从国外引进了先进的锻造设备，还通过许可证贸易和技术合作，引进相应的制造技术。如与德国EUMCO的合作获得热模锻压力机、平锻机、辊锻机的制造技术，提高了我国锻造设备的制造水平。目前我国已能自行设计制造2 500 t摩擦离合器式螺旋压力机，ϕ1 200楔模轧机、ϕ1 000辗锻机、10 000 kN冷挤压机以及前面已经提到的内外滑块公称吨位分别为4 000/4 000 kN数控双动挤压液压机，此外，还有电液锤、辗扩机和摆辗机等。现有锻造设备30 000台。

（2）锻造生产自动化及数控技术

1）锻造液压机组计算机控制系统 华中科技大学自20世纪中期开始，首先与西安重机所合作，在实验室1 000 kN油压机上进行锻造液压机组及自动控制系统的研究，其成果用于四川长城钢厂；80年代末90年代初，以单板机（2800）为基础，对一重20 000 kN水压机组进行了数控技术改造；1994年至现在，同兰州石油化工机械厂合作，先后为湖北大冶钢厂、张家港机械厂、太原矿山机械厂、株洲电力机车车辆厂、湖南锻造厂、铜陵车辆厂、沈阳车辆厂、青江机械厂、山东兖州合金钢厂和贵州新力航空锻造厂等开发了8 000 kN锻造液压机组及计算机控制系统；2000～2001年，又对首都钢铁公司从德国进口的10 000 kN、四川长城钢厂从日本进口的20 000 kN锻造液压机组进行了数控技术的改造。所开发和改造的锻造液压机组及计算机控制系由锻造液压机、操作机、移动砧库等组成的计算机控制的机组，从炉内出料到锻件锻成，全部实现机械化和自动化，仅需一人操作。在压力机滑块80次/min及以上时，能实现液压机与操作机的自动联动，锻件精度可达±1 mm；在高压、大流量、换向频繁条件下，对大运动惯量负荷进行平稳控制；操作机夹钳旋转精度为±1°、大车行走精度±10 mm；可连续24小时连续稳定地运行。

2）数控板管成形设备 20世纪80年代初，湖北三环（黄石）锻压机床有限公司开始与比利时LVD公司合作，先后开发了多种数控板管成形设备：

① PPEB系列数控板料折弯机，其特点是以工作台为测量基准的光栅尺安装在机架两侧，随时检测滑块与工作台的相对位置，在工作行程的任何位置，全闭环系统始终控制滑块的位置同步和折弯力，保证折弯过程的精确控制。

② PPT（K）、PPN（K）、PPNMZ、2－PPN、2－PPNMZ系列（数控）液压折弯机，其特点是采用了PPT系列机械同步系统和PPN系列机液滑阀系统，产品具有高精度，且稳定性好，工作可靠。

③ QGA（K）、QGO（K）、QVN（K）、QCS（K）系列（数控）液压剪板机，产品质量高。

近两年，该公司同德国汉斯舍恩机械制造有限公司合作开发了HFZP系列液压式精冲压力机，其特点是具有完整的标准配置，精度高、速度快、台面宽、工艺用途广；通过引进美国STRIPPIT公司最新技术并联合开发了STRIPPIT－HD20系列数控转塔冲床，该机床公称压力为200 kN，可冲压的板材厚度为6.35 mm，工作时，工作台全行程的重复精度达到±0.05 mm，制件精度为±0.10 mm。该公司于2002年初，成功地开发出PPEB5200/125型电液伺服数控折弯机。该机为大型折弯机，填补了国内大型折弯机的空白，在国际上为第三台。该机公称压力为52 000 kN，机器总重量1 000 t，长34 735 mm，宽14 110 mm，高14 960 mmm，由5轴电液伺服数控折弯机主机、模具、输进辊道、6轴前后托料机、4轴前后送料机、侧出料机和计算机控制系统组成。自动完成送料、托料、折弯成形、旋转管坯、出料等多种功能，可连续自动完成大直径缝焊管的折弯成形，所能折弯的最大缝焊管长13 000 mm，直径超过1 500 mm，控制精度可达0.1 mm。该机已成为我国西气东输管道生产的关键设备，当然，其用途更广。

3.3.2 锻压生产工艺的发展

（1）大锻件生产工艺的发展

大锻件通常是指以铸造钢锭为毛坯，在大于10 MN锻造液压机上采用自由锻方法锻造而成的锻件。由于重型机械、

发电设备、国防工业、石油化工、船舶制造业、机车车辆集中的关键大型零件均为大锻件，因此大锻件生产水平常被视为国家经济实力和机械工业发展的重要标志之一。通过多年的发展，特别是改革开放以来的努力，我国大锻件行业的面貌有了很大改观，达到了一定的生产规模和水平，且拥有的125 MN级大型锻造液压机数量，居世界第三位，仅次于美国和俄罗斯。基本上掌握了一些大型轴类件先进的锻造工艺方法、筒体及环件制造的三点砧锻造法、大直径带锥锻筒体收口锻造法等。燕山大学和沈阳重机厂合作开发了发电机转子用护环外补液压胀形法，制造了370 MN框架式护环液压胀形机。天津重机厂、第一重机厂、资阳机车厂分别开发了大型柴油机全纤维曲轴的TR与RR法镦锻工艺。此外国内还开发了管板类锻件生产新方法。就目前的大锻件生产水平来说，能够为320 MW（高中水头）水电机组，600 MW核电机组，4 200 mm特厚板轧机，300 MN模锻水压机及125 MN自由锻水压机，120 MN热模锻压力机，排水量70 000 t级船舶，单重900 t炼油用加氢反应容器，轴承用$\phi5.5$ m环形组件，23 m^3矿用挖掘机等装备提供成套大锻件。不仅基本上满足了国民经济各部门发展与装备自身的需求，而且还能向国外提供如300 MW核电机组及火电机组成套锻件，轧辊及轧钢设备用锻件，大型柴油机全纤维曲轴锻件，已具备走向国际市场的能力。

我国大锻件的生产已经取得很大的成就，但是由于锻造主机的配套设施不完备，影响了钢锭的材料利用率和生产效率，就行业整体水平而言与国外先进水平和国民经济的发展需求相比在锻件质量、重量、等级、品种、效率、消耗、工艺装备及科研开发能力，交货期等诸多方面有较大差距，这些问题必然对我国大锻件行业的市场竞争力以及企业的生存和发展，产生不利影响，应该找出有效的途径得到逐步改善和消除。

(2) 普通模锻工艺的发展

我国近10多年来，热模锻生产随着汽车、农用汽车等车辆的不断增长而同步发展，锻造技术水平有了较大的提高，模锻设备的构成有了明显的变化，热模锻压力机，摩擦压力机，高能螺旋压力机增加较快，并且是以组线生产为主，具有一定的机械化自动化生产水平。例如一汽锻造厂技改项目125 MN曲轴、前轴热模锻生产线，济南汽车厂63 MN转向节锻造生产线，仅汽车制造厂和配套件厂就增加热模锻压力机50余台套，特别应该指出的是这些生产线设备中有许多都是国产，而且锻造工艺装备和连线技术都是由国内厂、所联合研制完成的，标志着我国热模锻技术提高到一个新的水平。

针对我国锤类设备量大面广而又落后的状态，对电液锤和蒸汽锤的电液锤动力头进行了改造，在政府和中国锻压协会的积极组织维护下，取得了很大的进展，同时以引进的电液锤组成的锻造生产线，也使热模锻生产工艺技术有了新的提高。例如白城精锻厂和南宫曲轴连杆厂先后从德国BECHE引进了50 kJ和25 kJ的电液锤和相应的配套设备，建成连杆锻造生产线，锻造连杆的质量和精度达到了轿车锻件的技术要求，实现了轿车连杆生产的国产化，同时也使锻造工艺设计、模具制造以及锻件质量检测和控制有了新的进步。1999年起，浙江万向钱潮公司先后从德国LASCO公司进口了50 kJ、80 kJ和100 kJ的电液锤生产十字轴锻件，十字轴万向节分别出口美国、欧洲等国家，给主机厂直接配套，开创了我国锻造产品（汽车零部件）在海外市场直接为主机厂大批量配套的先河。安庆百协精密锻造公司也从德国BECHE公司进口了100 kJ电液锤及其相关设备，建成精锻汽车转向节生产线。

(3) 精密锻造技术的进步

精密锻造是指以金属体积塑性成形的方法获得表面光洁、尺寸精确的制品的锻造工艺，诸如冷挤压、温挤压、热挤压、热精密模锻、冷精密模锻、闭式锻造等，这些成形方法统称为精密锻造。

20世纪80年代以来，轿车和家电、摩托车业的发展，为冷锻工艺提供了新的发展机遇。上海第一汽车附件厂、大丰自行车飞轮厂（即现江苏森威集团）、天津汽车锻件厂、大连洗衣机厂、青岛手表厂都先后从日本和德国引进了冷锻压力机，用以生产汽车活塞销，DOJ型等速万向节，摩托车齿轮、花键轴、自行车中轴，调速壳，手表壳等零件，此时的温锻工艺仅在轴承行业的一些厂得以继续应用。但由于我国冷温锻造的市场小，以及冷温锻工艺体系发展不完备，诸如冷锻钢材、模具技术、冷锻设备等的欠缺，冷温锻工艺规模化生产的企业屈指可数只有几家。

20世纪90年代以来，随着轿车、摩托车产量的快速增长，冷温锻工艺生产的市场得以扩大，国家在“九五”科技攻关项目中加大了对冷温锻复合工艺研究的支持，厂所合作对BJ型等速万向节外壳温、冷锻复合工艺进行了开发研究，并获得成功。目前江苏森威集团已建成由500 kW中频感应加热炉，10 000 kN冷锻液压机（一台），4 000 kN（两台）和6 300 kN（两台）肘杆式压力机组成的冷温锻生产线，能够采用冷锻或冷温锻复合工艺生产DOJ型和BJ型等速万向节外壳年产120万件，DOJ型筒形壳内沟槽不再机加工，BJ型球冠内沟槽仅0.3 mm余量。该厂还自主开发了轿车变速箱轴的冷挤压工艺，并能生产符合DIN标准的冷锻输出和输入轴；采用气动式闭式锻造模架在冷锻压力机上生产等速万向节的内套和三销轴，年产100余万件。江苏太平洋公司对同步器结合齿轮的冷锻开发成功，并且投产。中国冷温锻造的发展，也引起外国企业的重视。近几年，丰田汽车公司在天津建成了天津丰田汽车锻造部件公司，采用冷温锻工艺生产等速万向节精锻件，年产100万套，用以温锻的1 600 t多工位自动传送压力机，年生产能力达400万件。与此同时，上海纳铁福公司从德国SCHULLER公司引进了1 600 t全自动温锻压力机生产线，主要生产轿车等速万向节外壳精锻件，年产300万件。这无疑是对国内精锻行业的巨大冲击，应该说冷温锻行业面临严峻的挑战。

热挤压多用于钢厂的合金钢无缝钢管的生产，以及高压气瓶及特种合金棒料的生产上。由于热挤压工艺润滑剂和模具寿命的技术难度大，在机械行业、汽车制造业中的应用较少，目前只有少数几家阀门厂引进了设备，用热挤压和热镦锻复合工艺生产发动机进排气门毛坯，该项工艺发展势头不大。

如前所述，我国开发齿轮热精锻工艺较早，弧齿锥齿轮、直齿锥齿轮、同步器齿环的精锻生产对设备要求不高，在摩擦压力机上就能满足工艺要求。同时国内还引进了闭塞锻造模架和用于齿轮冷温精锻的压力机。因此目前还没有受到国际齿轮精锻业的挑战，发展趋于稳定增长的势头。

高速热镦锻是指在高速自动热锻机上进行的热精锻工艺，具有生产效率高、锻件精度高的优点。20世纪80年代以来在我国高速镦锻工艺发展的基础上，韶关铸锻厂引进瑞士HATEBURE公司AMP30、AMP50高速镦锻机生产线，取得了良好的效果。后来，一汽引进了AMP70高速镦锻机生产线，用以精锻轿车齿坯，同时亦可精锻CVJ外壳、内套、三销轴、十字轴等轿车、摩托车零件，高速热镦锻在中小精锻件的生产中，也是一种高效精锻工艺。另外，高速自动热镦锻机在轴承行业得到应用，国内有一定的技术基础，可根据市场需求，着力投入开发研制。

(4) 回转成形工艺技术的发展

回转成形的特征是锻件产生局部连续变形，因此无需很



大的压力能够完成较大工件的锻造，诸如辊锻、楔横轧、摆辗、辗扩等工艺。

1）辊锻　进入20世纪80年代以后，由于我国从德国EUMCO公司引进辊锻机及机械手生产技术，使得我国模锻生产线的预成形制坯设备及操作机械手实现了国产化，从而使辗锻成形生产的锻件尺寸重量等都有所升级和发展。在90年代中期，又进一步开发了辊锻精确制坯，螺旋压力机整体模锻成形的卡车前轴生产线。到目前为止，采用精辊制坯，摩擦压力机或高能螺旋压力机整体终锻成形工艺生产汽车前轴的企业，已有重庆的青江机械厂、湖北三环车桥公司、山东光岳集团、合肥汽车锻件厂以及陕西红原锻造厂等，这些生产线的年设计生产量可达50余万件。辊锻成形将作为锻造生产线的制坯工序而得到广泛应用，我国辊锻工艺水平和辗锻设备及操作机械手的整机配套已较为成熟，具有较强的国际竞争力。

2）楔横轧　如前所述，北京科技大学的“轴类零件轧制研究与推广中心”对楔横轧的开发研究，技术推广起了积极的作用。

① 已开发投产的轴类零件300多种，居世界前列。这些零件的精度、复杂程度上都超过发明国捷克以及前苏联、美国等国。斜轧零件有$\phi25\sim\phi50$ mm轴承钢球、$\phi3\sim\phi6$ mm自行车钢珠、$\phi5\sim\phi25$ mm铝球、$\phi20\sim\phi50$ mm铜球、$\phi20\sim\phi125$ mm球磨钢球、$\phi10\sim\phi40$ mm圆柱、圆锥与球面滚子、汽车二联与四联齿轮与球钢、内燃机摇臂、电力挂环、锚杆等。楔横轧零件有汽车中的变速箱一轴、二轴、中间轴、后桥主动轴、转向球钢与拉杆、四联齿轮、吊耳轴、半轴，拖拉机中的变速箱Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ轴，半轴，发动机中的一缸至六缸凸轮轴、启动轴，油泵的二缸至六缸凸轮轴、齿轮轴，摩托车与自行车中的齿轮轴、传动主轴、花键轴、启动轴、曲柄，五金工具中的钳子、扳手、凿子、卸扣等。

② 在国内建成零件轧制生产线80多条，出口美国等国6条，累计生产近200多万吨轴类零件产值140多亿元。并向美国、印尼等国出口轧机、模具、加热等设备与相关技术。由于零件轧制生产效率高，学校以技术转让与技术入股等方式，在北京、上海、四川、湖北、山东等省市建成零件轧制专业化工厂10多家，向社会提供高质量低价格的毛坯件，收到显著的经济效益与社会效益。

③ 在校内速成模具研究制造中心，已为工厂提供各种模具1 000多副。由于零件轧制模具具有寿命长（平均20万件）、尺寸大、结构复杂等特点，集中建立一个模具研制中心是必要的。在国家科委与计委等支持下，1995年在北京科技大学建成占地面积约800 m² 的模具研制中心。该中心拥有加工直径$\phi1\ 000\sim\phi1\ 400$模具加工机床3台，加工直径$\phi500\sim\phi800$模具机床2台，加工直径$\phi140\sim\phi400$模具机床3台，其中数控机床4台。该中心除进行模具CAD/CAPP/CAM研究开发外，还向用户提供优质模具，建成八年来，已向用户提供各种模具1 000多副，总重量1 500多吨。

④ 零件轧机系列化并定点制造，已为国内外工厂提供近100台。在多年实验与生产的基础上，设计出系列零件轧机，如模横轧机H500、H630、H800、H1000、H1200，斜轧机$\phi20$ mm、$\phi40$ mm、$\phi50$ mm、$\phi60$ mm、$\phi80$ mm、$\phi100$ mm，在定点工厂批量生产。已制造与钢售近100台，包括钢售到美国等国6台。与楔横轧发明国捷克轧机比较，具有刚性大、调整方便、传动齿轮全封闭润滑、模具可用水冷却等优点，缺点是占地面积大，自动化程度不够高等。为此双方达成协议，将联合设计轧机，共同走向国际市场。

目前国内已有80台楔横轧机，最大$\phi1\ 200$。其中60台被用于轴类件轧制，由于国内市场有限，其生产能力没有得到充分发挥，今后通过国际市场的开发和产品对象的调整可改变目前的困境。

3）摆辗　从20世纪70年代开始，武汉汽车齿轮厂和上海电机锻造厂先后研制成功120 kN立式摆辗机和卧式摆辗机用以生产汽车半轴锻件，其后80年代摆辗工艺和设备得到进一步发展，目前已拥有6 300 kN及以下摆辗机60余台，其中有10余台是国内开发试制的。到目前为止，采用摆辗工艺生产汽车半轴已达批量生产，大直径法兰、钢锣、扬声器导磁体、各种齿轮也都批量生产，更值得注意的是，一些轿车、摩托车用零件，直齿锥齿轮，弧齿锥齿轮，钢质同步器齿环等，在重庆兵器五九研究所、江苏太平洋公司、青岛精锻齿轮厂、洛阳精锻齿轮厂等厂已投入批量生产。

4）辗扩　辗扩和镦锻是轴承行业两种十分重要的生产工艺。在轴承行业的生产中，直径$\leqslant\phi200$ mm的中小轴承占总量的99%；而直径在$\phi200\sim\phi400$ mm的不足1%；直径$>\phi400$ mm的大型轴承环（最大直径达$\phi500$ mm）不足总量的0.1%。对于量大面广的轴承环以往多采用热模锻制坯和辗扩（冷辗或热辗）相结合的复合工艺生产。同时在齿轮行业中，武汉汽车齿轮厂自己开发的卡车后桥从动齿轮热辗扩，摩擦压力机热精锻生产线，具有一定的推广价值。近几年我国在辗扩工艺及设备的开发取得显著进展，除哈、瓦、洛三大轴承厂装有4台$\phi1\ 000$ mm以上辗扩机外，安大锻造厂、红原铸锻公司、洛阳矿机厂、张家港船用锅炉厂都安装了大直径辗扩机。济南铸锻研究所研究的辊扩机已成系列产品，在国内市场中占有一定的份额。

（5）板料冲压生产工艺的发展

改革开放以来，首先是家用电器，如空调、冰箱、洗衣机、电视机、录像机、放像机等产品迅速发展；紧接着汽车制造工业大发展；近年来，轿车制造持续、稳定、快速发展。因而，通过对引进板料冲压工艺的吸收消化和自主开发，极大地带动了板料冲压生产和冲压工艺的发展。

一是板料冲压件的年生产量为世界第一。二是已形成大规模的生产方式，生产过程逐步实现机械化、自动化，并正向智能化、集成化方向发展。三是工艺技术水平明显提高，如一汽集团公司生产的大红旗轿车左/右前翼子板拉延件和发动机罩外推延件，产品尺寸精度，刚性及表面质量基本上达到了国际水平；四川丰田旅行车前围板拉延件、中前地板制件（模具由天津汽车模具有限公司制造）质量达到或接近国际水平；还有电子接插件的多工位精密冲裁也得到了快速发展。

以轿车外覆盖件、内覆盖件与骨架件为代表，新捷达王改型车和红旗“旗舰”车的全部外覆盖件与内覆盖件均为国产化冲压产品。红旗“世纪星”，宝来、奥迪A4、桑塔纳、别克、赛欧、富康、雅阁、夏利2000、奥拓、云雀、奇瑞、中华、羚羊、英格尔等轿车的外覆盖件，通过进口国外模具建立了生产线；而全部或部分内覆盖件与骨架件则采用国产模具建立了生产线。

（6）模具技术的进步

“六五”、“七五”期间在国家产业政策支持下，各级政府投入了数十亿人民币以及约25 000万美金对我国模具生产厂、点改造和产业化起到了决定性成果。至九十年代初，全国约有模具生产厂、点10 000多个，专业模具厂200多个，从业人员40多万人。总产值60多亿人民币，年产各类模具100万套（不包括简单模具），标准模架40万套，还不包括大多分数于各企业的工模具车间（分厂）内的模具生产，使我国在模具数量上已成为生产大国。

1996至2001年间，我国模具工业的产值年平均增长15%左右。在2001年，全国模具工业总产值达300亿元人民币，模具年产值当年位居世界第四。

2002年模具行业发展很快，模具总产值达到360亿元左



右。模具行业结构调整和体制改革步伐加快，主要表现为大型、精密、复杂、长寿命中高档模具及模具标准件发展速度快于行业总发展水平，生产冲压模具的专业模具厂数量及其能力增加较快，“三资”及私营企业发展很快，股份制改造步伐加快等。据不完全统计，目前，模具生产厂、点共有2万多家，从业人员约50万人，从地区分布来说，以珠江三角洲和长江三角洲为中心的东南沿海地区发展快于中西部地区，南方的发展快于北方。模具生产发展最快、最集中的省份是广东和浙江，浙江宁波和黄岩地区的“模具之乡”，广东一些大集团公司和迅速崛起的乡镇企业，都建立了自己的模具制造中心。这两个省的模具产值约占全国总量的60%以上。目前，我国模具总量仅次于日本、美国，已位居世界第三。

图1.0-1所示为我国近20年来模具年产值的变化曲线，由图可以看出，我国模具年产值稳步高速发展，势头良好。

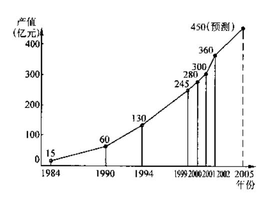


图1.0-1　近20年我国模具年产值情况

我国模具工业的技术水平近年来也取得了长足的进步。大型、精密、复杂、高效和长寿命模具上了一个新台阶。大型复杂冲模以汽车覆盖件模具为代表，已能生产部分新型轿车的覆盖件模具。体现高水平制造技术的多工位级进模的覆盖面，已从电机、电器铁芯片模具，扩展到接插件、电子枪零件、空调器散热片等家电零件模具，都达到了较高的水平，部分可以替代进口模具。

从近几年来看，模具市场需求巨大，前景广阔。据统计，2001年我国大陆制造工业时模具的市场需求量约为400亿元，按冲模在模具行业中所占份额比例，冲模的市场年需求约为200亿元，并且每年约以10%以上的速度增长。模具自给率从目前的70%提高到接近80%，大型、精密、复杂、长寿命模具需求的增长还将远远超过每年10%的增幅。

国内模具市场已被国内外同行一致看好。由于模具工业的快速发展壮大，已经引起了国内外模具厂商的密切关注。一些经常出人国际模具市场的行家们预言：“不出10年，我国将要成为世界模具生产中心。”

1）模具CAD/CAM的开发与应用　在我国模具行业，CAD/CAE/CAM技术得到逐步广泛推广应用。20世纪80年代中期，模具行业开始采用CAD/CAM技术，以后逐渐在全行业普及应用，使模具质量和复杂模具制造能力得到了迅速提高。1996年以来，大量先进的CAD/CAE/CAM一体化软件逐步进人模具行业。一些骨干模具生产企业开始使用高速加工技术，近年许多模具企业加大了用于技术进步的投资力度，将技术进步视为企业发展的重要动力。一些国内模具企业已普及了二维CAD，并陆续开始引进部分国际通用软件，如UG、Pro/Engineer、MAGMA SOFT等，并成功应用于冲压模具的设计制造中。

经过多年的努力，国内许多研究机构和大专院校开展模具技术的研究，也已经开发出具有自主知识产权的模具CAD/CAE/CAM软件，在模具CAD/CAE/CAM技术方面取得了显著进步。同时，电加工、数控加工技术在模具制造上得到普遍采用，提高了模具质量并缩短了模具设计制造周期。华中科技大学模具技术国家重点实验室开发的汽车覆盖件模具和级进模CAD/CAE/CAM软件，吉林大学汽车覆盖件成型技术所独立研制的汽车覆盖件冲压成型分析KMAS软件，上海交通大学模具CAD国家工程研究中心和北京机电研究所精冲技术国家工程研究中心开发的冷冲模、精冲模CAD软件等在国内模具行业逐步得到应用。

2）模具设计制造能力与水平的提高　近年来，模具行业技术设备水平不断提高。面对激烈的市场竞争，模具企业纷纷加大投人，引进国外先进的技术和设备，不断提高企业的技术设备水平和产品档次，在竞争中求得生存和发展壮大。

由于模具行业先进制造技术的发展，几乎集中了机械加工业的技术精华，机电一体化，辅之以钳工手工技巧的操作，模具制造行业更具独有的特征。随着并行工程和反向工程等先进技术在模具加工方面应用的不断发展，模具加工对数控机床提出了数字传递转化、多轴联动、高精度、高效率、高柔性、自动化等方面的要求；对电加工设备提出了高效率、低损耗、高精度、镜面加工、电火花数控铣削及加工中心等方面的要求；对三坐标测量机提出了高精度、高速度（一定时间内测量尺寸多）、易操作、具有三维扫描数字化系统、能低压接触和非接触测量、实现现场高柔性和在线测量、软件功能强等要求。模具制造业需要有高精高效高速铣削、数控电加工、虚拟轴数控加工、复合加工和低速线切割等机床设备。建立在模具标准化、零部件参数化和采用CNC、NC机床及制造工艺条件定量、规范化基础上的模具数字化设计、制造，是现代化模具生产的主要特征。其工艺集成度高，适应性强，精度高，模具成型零件在CNC-WEDM机床、成形磨床、坐标磨床、成形铣与高速成形铣等机床上的加工精度，即加工误差可保证在0.002～0.01 mm范围。

据一汽模具公司、东风汽车模具厂、天汽模具公司、成飞模具公司统计：拥有数控机床56台，其中大型三轴数控机床35台；高速铣床5台（主轴转速20 000 r/min的两台）；有计算机·工作站143台（套）；配备了UG、EUCLID、CATIA、Pro/E等软件200套，还有成形分析和逆向工程软件8套；有大型三坐标测量机5台；数控磨刀机1台；研配压机16台；调试压机30台。

在广东省模具工业水平较高的10家专业模具厂中，其高新设备的投人超过了3亿元，购进立式加工中心、火花机、慢走丝线切割机、立式高速加工中心，高速高精度电火花成型机、三维激光数字扫描仪、数控三坐标测量机、校模机等高新设备330多台套，超过了1996年以前广东省模具行业所拥有高新设备的总价值和总数量。许多企业掌握了三维模具设计技术和3轴至5轴模具加工编程技术，以及高速加工切削技术，硬件条件非常先进，制造工艺水平和人才培养也有了很大发展。目前，有些企业已基本与国际接轨，模具制造装备和软件基本上接近国际水平。

3.3.3　锻造加热技术的发展

我国锻造行业加热技术的发展必须遵循确定的燃料政策，即以煤为主，限制用油，合理用电，因地制宜，就地取材。对于中小锻件生产的加热，我国普遍采用的是火焰加热（燃煤、煤气等），如何提高加热效率，改善环境保护是急待解决的课题。进人20世纪80年代以后，可控制中频电源感应加热炉技术在国内较为成熟，这一时期新建的齿轮、齿坯



精锻生产线以及曲轴、连杆热模锻生产线，以后辊锻、楔横轧、摆辗辗扩等成形工艺的加热都采用中频感应加热炉，目前在国内占有较大市场。当然与国际发达国家的一些著名公司相比，在质量、品种、规格、性能、寿命等方面有不同程度的差距，需要进一步改进提高。

大锻件生产的加热采用煤气及天然气加热炉，当前发展的重点应是提高与液压机的配套能力，提高锻造能力，提高产品质量和降低能耗，发展快速加热技术，实现计算机程序控制，实现炉温、炉内压力、气氛和炉温计测的自动控制，采用高效节能燃烧系统和先进预热装置，炉体内装设陶瓷纤维保温材料，炉门自动压紧，炉内电动开启等。

4　中国锻压技术与国外先进锻压技术的比较

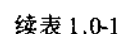
（1）锻造工艺装备与技术方面的主要差距

我国锻件年产量居世界首位，是锻件生产大国，但还不是生产强国。1997年我国锻件总产量为253万吨，其中模锻件为150.9万吨，模锻件占锻件总产量的59.6%。工业发达国家模锻件占锻件比例已达到80%。其原因主要是由于我国的锻造工艺装备与技术水平尚存在一定的差距，有的方面差距甚大。表1.0-1列出了我国锻压工艺装备与技术同国外先进水平的比较。

表1.0-1　工艺装备与技术水平国内外对比

序号	项目		工业发达国家（20世纪80～90年代）水平	国内水平
1	模锻件比例		美国78.6%，法国89.4%，日本86.2%（以上为1995年），德国81.9%。前苏联1979年为67.5%。冷锻件为热模锻件的比例：德国9.3%，法国16.2%，日本5.9%。有色金属锻件生产技术先进	1990年以前平均为36%，1997年平均为50%～60%，现约60%，模锻件比例上升较快。有色金属锻件存在缺口，数量不足，有待开发
2	自由锻装备水平	①大锻件生产	①压力机、炉子、起重运输设备厂，厂房综合协调配套。②压机液压系统和控制部分采用微电子技术，锻件尺寸自动检测或激光遥测尺寸。加热炉计算机程控，采用高效节能燃烧系统及余热利用，可实现炉温、炉压、炉内气氛等自动控制。③工厂钢锭生产、供应和锻件后续加工配套	①10～125 MN自由锻水压机有70多台，生产能力特富裕，但装备水平较低，仅少数快锻液压机与操作机联动。②在"八五"、"九五"期间大锻件年产量为30万吨左右，其中60～125 MN压机上的锻件约占1/10，即4～5万吨，只需1～2台即够用，"十五"期间加倍计2～3台足够，而现在60～125 MN压机有7台
		②中小型自由锻件	中小型快锻液压机与操作机联动普遍。自由锻锤数量少，工厂规模较大，生产集中，机械化程度高，生产效率高。普遍以天然气或油为燃料	蒸汽自由锻锤1～5 t共约1 600台，仅少数改为电液锤。电动空气锤26 400台，能力过富裕。水压机大多以发生炉煤气或油为燃料，中小自锻锤车间大多以煤为燃料
3	大锻件生产工艺		①日本在100 MN压机上已锻最大钢锭600 t，韩国490 t，美国320 t，德国400 t以上，俄罗斯420 t。②注锭时真空度26.7～66.7 Pa。③已锻最大锻件320 t。④成套生产火电锻件≥1 000 MW。⑤锻件厚度（直径）公差±1 mm，意大利126 MN水压机夹持重量100/150 t，压机与操作机联动，锻件公差达±3 mm	①钢锭260 t。②真空度26.7～13.3 Pa。③锻件150 t。④火电≤600 MW。⑤小型快锻±1 mm。⑥具有电炉炼钢，精炼炉精炼和真空注锭，仅个别厂家以双真空生产钢锭。⑦大锻件生产能力过剩，但还有些锻件需进口。1997～1999年，从韩国进口大锻件每年1 300万美元
4	模锻装备水平		①精密剪切为主。②普遍采用中频感应加热和天然气为燃料。③热模锻压力机达成形设备总数的40%～64%，辅以平锻机、螺旋压力机、电液锤等。④在多工位自动压力机、自动热锻机、综合自动线上生产的锻件占锻件总量40%以上	①锯床下料仍占很大比重。②中频感应加热的锻件在汽车行业约占44%，全国齿轮行业约占26%，其余为煤气、重油（少量）、原煤为燃料。③全国1～16 t模锻锤650台，摩擦压力机1 300台，热模锻压力机110台。④热模锻压力机仅占成形设备总数的14.5%
5	热模锻工艺		①采用精密剪切下料。②少无氧化加热，精密的机器和模具设计、制造、使用，适当的润滑冷却及后续加工等成套技术。达到近净形成形，具有精确的尺寸或重量公差，复杂形状表面可不加工或只微量加工，早已形成大规模生产	小轿车的形状复杂，小而精的钢质和有色金属锻件难以满足市场需要。在"八五"、"九五"期间汽车工业所建模锻线，约2/3的主机为国外进口设备，有些为全线进口。引进设备和制造技术占比例很大，国内独创的只占很少一部分
6	温锻工艺		该工艺适合零件总产量20万件以上，每批投入1～2万件，零件重量0.5～5 kg，通常精度IT11～IT12。美德日韩已大量生产	至20世纪80年代我国汽车、摩托车、家电工业发展迅速，有些过去用机加工或热锻成形的零件，现在必须采用冷温工艺生产
7	冷锻工艺		日本每辆汽车使用的冷成形零件平均达50 kg（不包括每辆车有30 kg的各种紧固件），在美国和欧洲也接近40 kg，最大冷锻件重22.7 kg	我国每辆汽车使用的冷成形零件平均不到日本的1/5。东汽最大冷挤压件球头销1.5 kg，南汽IVECO车半轴套管ϕ80/60×720 mm冷缩径件重12 kg
8	生产率	①水压机	每10 MN锻造液压机平均锻件产量3 600 t/a	平均2 265 t/a，中信重机1 217 t/a，中原特钢3 046 t/a
		②模锻设备	折合吨位每吨锤年产锻件600～900 t	每吨锤年产锻件300～400 t





续表 1.0-1

序号	项目		工业发达国家（20 世纪 80～90 年代）水平	国内水平
8	生产率	③全员劳动生产率	①大锻件 286.5 t/(人·年)。②中小自由锻件，1995 年法国 33.648 t/(人·年)。③模锻件，同年法国平均 41.59 t/(人·年)，日本 1979 年平均 118.6 t/(人·年)，1990～1998 年 127～161 t/(人·年)	①大锻件国内平均 52.63 t/（人·年）。②模锻件：以 1995 年为例，一汽 29.42 t/（人·年），东汽 23.89 t/（人·年），一拖 22.91 t/（人·年）
9	材料利用率		①大锻件钢锭利用率 60%～63%。②模锻件：日三菱川崎厂 75%～92%，三菱二本松 80%，理研 79%，丰田 73%～93%，知多 78%，俄卡马厂设计 84%	①大锻件钢锭利用率 54%～56%。②模锻件：1995 年，一汽 72.35%，东汽 78.51%，一拖 71.47%
10	锻件废品率		大锻件：重要锻件几乎 100%合格。模锻件：三菱川崎厂 0.35%，三菱二本松 0.9%，五十铃 0.5%，理研 1.0%，丰田 0.55%，知多 0.5%，住友大型件 1.5%	大锻件合格率平均 90%。模锻件：一汽 1995 年 3.24%，1996 年 3.14%。东汽 1995 年 2.03%，1996 年 2.01%。一拖 1995 年 0.98%，1996 年 1.01%
11	锻件能耗		大锻件：燃耗 0.44 t 标煤/t 锻件。模锻件、中小自由锻件：燃耗 0.3 t 标煤/t 锻件。综合：能耗 0.57～0.8 t 标煤/t 锻件	大锻件（含热处理）：燃耗平均 1.312 t 标煤/t 锻件。模锻件：一拖 1995 年为 0.55 t 标煤/t 锻件，1996 年为 0.49 t 标煤/t 锻件。综合：一汽 1995 年为 1.53t 标煤/t 锻件，1996 年为 1.44 t 标煤/t 锻件，东汽 1995 年为 1.47t 标煤/t 锻件，1996 年为 1.29 t 标煤/t 锻件
12	锻造专业化	①专业化程度	①工业发达国家达 70%。②锻造生产厂点占机械工业厂点数：日本 2%，美国 1.3%。③锻造专业厂占全行业比例：前苏联 19%，日本 85%，美国 60%。④商品锻件占总产量比例日本 79%，美国 66.4%	①专业化程度 36%，能批量生产模锻件的专业锻造厂约 100 家。②水压机锻件外协件占 70%，但无专业锻造厂，都附属于重机厂内
		②专业化技术水平	按不同工艺、零件类型、尺寸、重量，用先进技术组织生产，技术经济效益高	出现封头、辗环、热精锻、温锻、冷锻专业厂，曲轴连杆厂等。有些厂已采用新工艺、新技术、新材料进行生产，经济效益较好
13	锻造工艺过程自动化水平		锻压自动线：美国 5 085 条，前苏联 6 136 条，日本 900 条	综合自动线和自动机之和约 300 条左右，其中 50～125 MN 曲柄热模压力机模锻曲轴（前轴）线 16 条

(2) 冲压工艺装备与技术方面的主要差距

我国冲压工艺装备与技术方面同国外先进水平的差距主要表现在如下三个方面：一是以轿车覆盖件为代表的大型薄板件冲压设备及机械化、自动化生产线装备；二是以电子接插件为代表的多工位精冲压力机，在设备方面主要是大型、精密、高效专用压力机及配套的机械手和机器人；三是冲压模具，可以说，冲压模具方面的差距更突出，其影响也更大。下面着重说明所存在的主要问题。

我国模具工业无论是在数量还是质量上，与工业发达国家还存在着很大的差距，模具商品化和标准化程度也比国际水平低。目前国内市场的满足率仅在 70%左右，我国大部分模具是企业自产自用，真正作为商品流通的模具仅占 1/3。所产模具基本上以中低档为主，一些大型、精密、复杂和长寿命的高档模具，在技术上无法与发达国家相比，生产能力也远远不能满足国民经济发展的需要。近几年，我国模具净进口量居世界首位，是世界上最大的模具进口国。

我国模具产品结构中，冲压模具约占 50%，塑料模具约占 34%，压铸模具约占 6%，其他各类模具约占 10%。我国主要模具生产能力集中在各产品厂的模具分厂（或车间）内，模具自产自销比例高达 60%～70%，而国外 70%以上是商品模具。即使是专业模具厂，我国也大多数是“大而全”、“小而全”，国外则大多是“小而专”、“小而精”。

国内外模具的质量水平、开发能力和经济效益仍有很大差距。发达国家一个模具职工平均创造产值 15 万～20 万美元，我国只有 4 万～5 万元人民币。国外企业大都有一定利润，而我国模具企业大多是微利甚至亏损。

模具行业目前存在的主要问题：

1）中、低档模具市场竞争加剧，产品价格降低过度，对产品质量造成不良影响，并降低了许多模具生产企业的效益，私营及个体企业技术改造步伐缓慢。模具企业的管理落后更甚于技术落后。整个行业感到人才缺乏，特别是中高档技术人才和经营管理人才。很多模具企业具备有一流的设计制造设备，但不能生产相应水平的模具。在引进软、硬件工作上也存在着不少问题，缺少规划，引进混乱，偏爱高档，消化不良，进口的 CAD/CAM 系统和设备，很少在其上进行二次开发，资源利用率低。并且，一些中小型企业由于缺乏资金，很少应用 CAD/CAM，只是使用计算机绘图而已，许多模具生产小厂至今仍然采用着传统的手工绘图方式。由于机械行业无序竞争，模具市场不够规范，模具质量良莠不齐，使得大量模具用户对国产模具的质量和供货周期持怀疑态度，导致每年数亿美元的模具市场向国外开放。

2）在模具材料方面，高新技术产业和现代信息产业的飞速发展，对现代模具的技术要求越来越高。比如计算机的一些接插件、元器件以及许多数字化电子产品，都必须采用精密冲压模具。集成电路的设计与制造，需要精密级进冲模，对模具材料提出了更高的质量要求。快节奏、现代化的产品生产速度，要求模具制造周期很短，一般在 30 天左右。其中设计和备料期不超过 10 天，并要求同时进行。这样，就要求模具钢的交货期仅有 5 天上下的期限。模具制造企业大都对模具钢实施“零库存”管理模式。从而要求钢厂必须满足用户现代化生产的供坯需求，并且对模具钢质量和使用寿命作出保证和承诺。

模具制造厂家希望国产模具钢具有优异的力学性能，同时具有良好的工艺性能和综合使用性能，并针对模具服役的工况，要求模具钢有较高的耐用度，使模具能达到较高的使用寿命。而目前我国的冷作模具钢综合性能不能满足使用性

能的要求。

由于现代、大型、复杂、长寿命的模具加工费用极其昂贵，模具制造对模具钢质量及其使用寿命极为关注。由于担心国产模具钢质量问题。每年就有40%的中高档模具必须从国外进口。

在我国模具材料的应用工作中，还缺乏有关指导性强、实用的技术资料。一些性能优良的新钢种的生产和应用量仍太少。钢的质量不够稳定，规格单一，绝大部分是黑皮圆钢，用户不得不另行改锻。品种规格多样化、产品精品化是今后需要尽快解决的问题之一。尚待开发具有特殊性能的钢种，进一步完善钢种系列。另外，产销渠道不畅通，用户甚至不知道从何处购买所需的新钢种。今后需要建立模具选材、用材的专家系统，还要加强表面处理技术的应用。

3）在模具加工设备方面，我国有近2万个的模具生产厂、点，先进的模具加工设备技术固然十分重要，然而同时有大量的企业希望有适用性好、价格低廉、质量可靠、性能稳定的加工设备，诸如经济型及简易数控、微机版本软件、普及型机床等。

5 21世纪材料塑性成形的发展趋势

发达国家，特别是日本、美国、欧洲等国政府十分重视材料塑性成形尤其是锻造业的未来发展。以美国锻造工业协会和锻造工业教育研究协会为主，在美国能源厅工业技术局资助下，美国组成了44人专家委员会，分属“工具和材料”、“能源和环境”、“质量和生产性”三个工作组，制定了“锻造工业的未来和应对战略计划”及“锻造工业发展指南”。美国锻造工业的未来发展目标如下。

1）模具　模具寿命比现在延长10倍；单件锻件模具费用减少50%；从订货开始，模具制造24 h完成。

2）材料　锻造材料用量减少15%；废品率减少90%。

3）能源　锻造生产综合能耗和人力/国际使用量的比率减少75%。

4）生产效率　全员人均生产率提高50%；锻造设备年均利用率90%以上；锻件平均成本降低60%。

5）锻件质量　用户返回不良品为25%；质量管理达到±8（标准偏差）；使用中的锻件故障为零。

6）环境保护　加热中产生有害物最小或为零；车间内不使用有害物；锻造作业副产品全部回收再利用；锻造车间噪声85 dB以下。

以技术立国为本的日本，在最近几年组成有专家和政府官员参加的素形材技术战略委员会，其中由20人组成的锻造工作委员会也制定了21世纪头25年的战略计划，包括锻造在内的素形材技术的最终目标是：“我国素形材产业确立和掌握着世界制造业生命线的重要技术”，技术发展总政策是：“技术革新系统由传统型向新领域的创新型转变”。

日本作为当今世界锻造大国，在全球化生产体制的进程中，仍想在技术人才培养、锻造机械设备开发，锻造性高的材料开发以及满足产品性能的新的锻造方法的创造等方面保持领先地位，今后25年日本锻造技术发展战略为：

在全球化体制中，继续保持最新锻造技术的领先地位，考虑全球化发展的需要，确立锻造技术开发中心，成为向世界提供研究、教育、信息的中心。其具体方向如下。

1）形成我国有利的制造环境的同时，向世界提供高质量锻件、锻造方法，以及工程技术、模具、材料和润滑的最新开发技术。

2）世界和亚洲最新锻造技术情报和数据总线的传输，通用快速解决问题的基础技术的整备，以及共有化系统的构筑。

3）在产学官的支持下，锻造基础技术和最新技术的远程教育，企业的技术交流和共同研究，国际技术的召集要成立相应的机关。

与上述发展战略相应的展望及计划为：

1）今后的展望　①继续推进产品集约化，并具有高强度轻量化为特征的锻件生产；②高材料利用率和净形率，能源有效利用和CO_2的削减；有利于环保的高性能润滑剂的开发；创新性的锻造工艺，模具材料和模具表面技术，润滑方法等方面的改善，大幅提高模具寿命；利用计算机进行锻造模拟和仿真（VR），优化锻造工艺；通过模具技术和成形技术的提高推进高精度锻造生产。

2）教育（人才培养体系的构成）　集约化生产工程技术相适应的人才培养；具有技术创造型的优秀人才培养体系的构筑；提高人的素质和技术水平教育设备（施）的补充；改善设计和生产技术人员的锻造技术不足，能完成基本教育计划和教育研究基地的整备。

3）关键技术领域（地球环境保护集约化生产工程和超高精度）　①CAD新技术应用和容易实现集约化生产工程的3D-CAD-CAM-CAE工具的开发；②锻造材料组织及热处理变形的预测和控制技术的开发；③复合成形工艺的最佳组合；复杂形状，高精度锻件（螺旋齿轮）的模具制造技术；高精度、自动模具表面精加工（磨削）技术；模锻锤用机械手系统；提高难加工材料的锻造技术；非磷润滑剂的开发；能够改善模具寿命的温、热锻用高性能润滑剂的开发；高润滑性能材料的开发；高性能表面被膜处理技术的开发（模具寿命高，润滑剂性能好）；超高寿命模具材料开发；强度高，锻造性好的钢材开发；能大幅度降低能耗的非调质易快削钢的开发；在可能的锻造温度区域进行高精度锻造的有利技术；热锻件的直接热处理技术；开发复杂及大尺寸零件净形成形技术的确定；无人锻造生产的传感器和检测方法的开发；能够适应新的柔性生产设备的开发。

4）环境保护和能源　没有废液废材的生产体系的构成（车间没有环境污染）；应对市场全球化的企业结构的改革；能够削减CO_2的产品设计；适应广大操作者的生产设备；再利用产品的性能改善技术；不发生氧化和过烧的锻造工艺。

5）目标（轻量化、复杂形状、高精度、净形率、环保）寿命短的电子零件制品模具快速制作和生产体制的构成；产品制造厂、零部件组装厂，以及锻造专业厂相适合的集约化生产工程系统的构筑；材料利用率达90%以上的净形锻造技术；利用各种组合技术提高模具寿命10倍以上；复杂形状齿形件的高精度化锻造（净形锻造）；无环境污染运动；CO_2排放削减25%；完全再利用生产系统的确立；构筑人才培养体制和共同研究体制。

从日本、美国21世纪头20年锻造技术的发展战略不难看出，我国锻造行业在今后面临的形势和任务相当严峻，从日、美锻造发展的计划中，我们也能受到启迪。我国在当前首先是要使锻造企业在入世以后转型接轨迅速适应全球化的要求，另一方面在今后20年的时间内，缩短与发达国家的差距，并在锻造技术的若干领域和方面形成自己的特色，发展具有完全知识产权的工艺技术和设备，使我国的锻造生产基本实现现代化。

以轿车为例，其锻造、冲压件的发展趋势是以轻代重，以薄代厚，少无切削精密化，成线成套，高效自动化。

其具体方向与趋势主要是：

1）零件毛坯精密化甚至达到磨削的效果，稍作处理或不作处理就可直接装车。

2）采用超薄高强度钢板和铝、镁合金等轻金属板料作为车身覆盖件与骨架，获得高的强度/重量比。

3）应用组合件，减少整车零部件的数量。

4）减少模具和工装的数量。

5）提高工艺可靠性和设备的制造柔性。



6）减少设备的运行巡视。

7）缩短设计制造到市场销售的周期等。

6 加入WTO后材料塑性成形发展的机遇与应对挑战的策略及措施

6.1 加入WTO后材料塑性成形发展的机遇

我国加入WTO后，给材料塑性成形技术和塑性成形加工产业带来了大好的发展机遇，这主要表现在两个方面。

一是，工业发达国家的制造业向中国转移。2002年，新华社北京10月2日电‘中国正成为“世界工厂”’。世界贸易组织日前发布的《2001年世界投资报告》指出，虽然全球外国直接投资今年将减少，但中国是个例外。目前，世界上最大的500家跨国公司已有近400家来华投资，美国排名前500的大公司有一半以上到中国投资。

全球的跨国公司之所以对中国情有独钟，关键在中国的基础设施优良、劳动力资源丰富、劳动成本不高。这是其他许多国家和地区做不到的。加入WTO以来的情况已充分表明，工业发达国家纷纷将其制造业转向中国。2002年外国向中国投资达500亿美元，已超过美国成为世界上吸引外资最多的国家。

二是，中国将成为全球汽车零部件工业的生产基地。汽车工业已成为我国的支柱产业和国民经济快速发展的亮点。2002年，我国汽车产量达310万辆，2003年超过400万辆，其中，轿车达到180万辆。整个工业的快速发展和国际制造业向中国转移，都为我国汽车零部件制造业的发展带来了大好时机。

20世纪90年代以来，国际汽车零部件工业以及整车厂商与零部件厂商的相互关系都发生了深刻的变化。主要体现在系统化、模块化、电子化技术的大量运用，同时体现在整车厂和汽车零部件厂相互独立的趋势和整车厂全球独立采购体系的形成；从产业组织结构的角度看，主要体现在国际零部件厂商之间的竞争格局的形成和竞争的加剧以及零部件厂商之间的横向并购。

2001年10月，世界汽车行业享有声誉的罗兰·贝格国际管理咨询公司汽车工业研究中心，发布了名为“入世后中国汽车工业十大预言”的最新调查报告中指出：外资零部件供应商将立足于全球市场，从战略上进一步界定其在中国的业务发展，中国将成为全球零部件工业的生产基地。

国内有关人士提出：我国汽车零部件工业在国际分工体系中成为世界性或区域性的汽车、零部件制造基地是有一定现实基础的，其理由是：

1）中国汽车零部件工业已经具备一定的生产能力和技术能力，并具有一定的竞争力。

2）中国零部件国内市场潜力巨大，加入WTO后国际市场会进一步扩大。

3）汽车零部件跨国公司已经有把中国作为供应基地的迹象。

因此，中国汽车零部件工业未来发展战略应定位在成为世界或区域性的汽车零部件制造基地，而不仅仅为我国整车产业的配套。

锻件和冲压件，尤其是锻件，仅少数产品为技术密集型，多数为材料与劳动密集型，且因热加工劳动条件差、强度大，将必然成为机械制造业重点转移的产业。因而，给我国材料塑性成形加工产业和技术带来了极好发展机遇。

6.2 材料塑性成形面临的挑战

加入WTO后，我国材料塑性成形工业所面临的共性问题，即与其他制造业所面临的同样问题，主要是两个方面。其一，面临国际竞争的严峻挑战，未来2~3年内，将逐步减少和取消关税保护，走向全面的市场经济，必将受到国外先进技术和优质产品的急烈竞争；其二，技术标准落后且不统一，与国际相应的技术标准不接轨。

所面临的个性问题，即材料塑性成形尤其是锻造工业领域内的问题，主要有如下四个方面。

（1）锻造生产厂点过多，专业化程度低

我国锻造行业由于长期受计划经济体制的影响，本来锻造厂点就多达6 000多家，20世纪80年代以后兴起的乡镇锻造厂点大约4 000家，这些厂点大多数规模小，综合素质低，工艺落后，设备陈旧，进一步加剧了锻造业结构不合理的状况，专业锻造厂（能批量生产模锻件厂）大约100多家，专业化程度仅36%，全行业有职工20余万人。锻件产量与我国同一水平的日本，锻造厂493家，职工17 000人，欧洲锻造联盟8国（德国、法国、英国、意大利、西班牙、瑞典、波兰、捷克等）现有锻造厂350家，职工65 000名，年产锻件460万吨，锻造专业化水平70%~80%。相比之下，我国锻造行业面临着相当紧迫的体制改革和创新问题

（2）锻造设备落后，生产工艺水平低

我国拥有大型自由锻造水压机4台，而全世界8 000吨以上的水压机总共20台，就大型锻钢件生产能力来看，水压机能力过剩，但是作为锻造行业占主要位置的热模锻设备（包括各种成形设备）整体构成与国外先进水平相比，确实落后。日本现有热模锻机械压力机440台，其中全自动或带传送装置的110台，冷锻压力机250台，其他仅卧式高速镦锻机就有3 000~4 000台。我国3万台锻造设备中，自由锻锤占88%；模锻设备占12%，其中热模锻压力机120台，冷锻压力机50台（估计），卧式高速镦锻机15台，回转成形350台。从锻造设备的构成状态所知，相当多的锻件是由蒸空锤和摩擦压力机生产的，锻造工艺水平低，锻件质量不稳定，废品率2%~3%，尺寸精度和表面质量差，能耗高，污染严重，模锻件占锻件的60%，发达国家则为80%以上。日本年产精锻件70万吨，其中冷锻件10万吨，每辆轿车冷锻件达56 kg，79个品种。我国冷、源锻等先进高效精密成形工艺生产实用很少，在汽车摩托车行业中，齿轮热精锻和为数不多的冷锻件估计年产精锻件10万吨，其中冷锻件大约有2万吨，精锻件仅占模锻件的6%，而日本则为37%以上。

（3）锻造生产能耗高、效率低

锻造行业就全球范围而言，属高能耗行业。我国锻造行业由于生产厂点分散，数目过多，工艺技术和设备落后，锻件材料利用率低，能源综合消耗大，经济生产效益率低。据日本通产调查分析，世界各主要国家的锻造生产市场资料见表1.0-2。

我国锻造行业的初步统计结果是：

1）全员劳动生产率　大锻件5 216 t/(总人数·年)；模锻件（平均）25.4 t/(总人数·年)。

2）材料利用率　大锻件钢锭利用率54%~56%；模锻件（平均）74%。

3）锻件能耗　大锻件，燃耗平均1.312 t标煤/t锻件。

模锻件以95/96年为例，一汽和东汽平均综合能耗1.5 t~1.36 t标煤/t锻件。

4）锻件废品率　大锻件平均为10%，模锻件（一汽、东汽、一拖）平均为2.5%。

（4）锻造行业技术创新能力差

当前锻造行业普遍面临着重重困难，企业的生存与发展受到严峻的考验，为能走出困境，求得生存与发展，最根本的出路是提高企业的竞争能力。企业竞争能力是其综合素质的集中表现，如何提高企业竞争力，最核心的要素是技术创新，企业竞争的基本手段就是通过技术创新、科技进步、开



发出高质量，低成本，市场竞争力强的产品。

表 1.0-2　主要锻造国家锻造生产情况调查表

项目＼国名	西班牙	法国	英国	德国	日本	北美	中国
锻件/t·（总人数·年）$^{-1}$	68	51	55	55	150	75	25.4
锻件/t·（人·年）$^{-1}$	92	85	73	75	260	132	
锻件/kg·（人·时）$^{-1}$	53	52	35	49	133	67	
销售额/百万日元·(人·年)$^{-1}$	14	15	12	17	43	16	1.8~2.0
材料费（日元）/kg	92	113	117	108	127	87	85
能源费(日元)/销售/%	6.3	5.4	5.1	6.3	5.8	4.8	
模具费/销售/%	4.6	8.6	6.1	11.0	11.3	5.5	
税利/销售/%	15.3	3.1	3.1	5.8	6.6	4.5	
工资/销售/%	25.5	25.2	29.8	37.0	19.0	25.8	5~6

注：表中我国有关资料是按一汽、东汽资料分析结果。

6.3　应对挑战的策略与措施

（1）锻造生产与技术的发展策略

1）坚持走专业化生产的道路　锻造专业化就是按不同类型、尺寸、重量的锻件采用不同的成形工艺大规模组织生产。锻造专业化生产，是按锻件本身的特点采用最适用的先进制造工艺技术和高效自动装备。因而有利于工艺技术的不断积累和创新；易于形成企业的校术优势和名牌产品；锻件质量不断改进提高；锻件生产规模大、效率高、成本低、效益好，增强企业的市场竞争力。

2）坚持走技术改造和创新的发展道路　锻造行业从长远来看，企业竞争和发展的根本手段是技术创新，但当前锻造行业面临的基本状况和任务，是通过利用技术改造项目，实现工艺技术创新、产品升级，增强竞争力，使企业获得发展。大锻件生产行业要选择条件好的企业，通过技改项目支持，实现万吨水压机控制、操作、加热、钢锭铸造等设备和技术的现代化，提高大锻件生产能力，减少进口，增加出口，实现大锻件生产设备的优化配置。通过各种类型的技术改造和创新，逐渐在锻造行业中培育出一批产品有特点，质量稳定，市场占有率高的骨干企业，龙头企业。

3）支持发展锻造生产的现代化　我国锻造行业整体水平同发达国家相比差距甚大，要实现锻造业的赶超目标，就必须利用一切先进技术，促进锻造行业的现代化生产，锻件生产优质，高效、低耗、低成本、低污染是锻造现代化的根本目的。利用先进的成形工艺技术提高锻件的材料利用率，发展特种成形工艺，利用计算机进行变形模拟，优化锻造工艺及模具设计，实现 CAD/CAM/CAE，从面提高锻件的成形精度，发展净形或近净形成形技术，提高锻件净形率。采用先进的锻造设备，实现锻造过程的自动化无人化生产，从根本上改变锻造生产重体力劳动的困境。采用先进的加热，无污染润滑剂，表面处理技术，使得锻造生产最终由黑面裙走向白大褂的时代，即绿色制造，取得生产和环境保护的平衡发展。锻造行业的科研院所、高校、锻造集团，要有重点的通过引进、消化、自主开发等方式，通过产、学、研紧密结合，逐步实现锻造生产的现代化。

4）加强科研单位、院校和企业的联合，走产、学、研协调发展的道路　我国目前使用的锻造数据体系基本上保持了前苏联的内容，使用的手册也基本上沿用了当时的数据，没有开展很多理论到实践的转化工作。加强企业与科研单位及院校的合作，是做好这方面工作最重要的途径。首先企业要欢迎科研人员到企业收集资料，其次科研人员要积极向企业推广使用自己的科研成果，双方共同目标是促进科研成果转化，取得经济效益，达到双赢的结果。在条件允许的情况下，企业和科研单位、院校联合起来，对现有锻造工艺规程进行重新修正和补充，以适应新形势的需要。

（2）锻造技术及装备的发展重点

1）加快普通模锻生产的校术改造

① 普通热模锻生产能力富裕，但是真正能满足轻型车、轿车的高精度锻件的生产厂不多，因此要加速技术改造步伐，迅速改变目前的困境。

② 汽车集团的锻造厂以提高精度和效益，节能，节材为目标进行技术改造。要强化质量管理，严格工艺制度；要对影响锻件质量的生产环节进行技术革新改造，设备更新，提高对锻件质量的全流程监控能力，减少废品率，降低消耗；要以提高模具寿命为中心，对模具材料及热处理、加工技术及设备、锻造加热；对锻造工艺、设备、润滑等有关影响模具寿命的因素和技术环节，系统地进行分析，找出原因，采取有力措施，延长模具寿命，保证锻件的尺寸精度。

③ 加快蒸空锤淘汰和改造液气锤的步伐，着力开展电液锤研制。蒸空模锻锤我国有 1 100 台，由于能耗高，锻件质量精度低，长期困扰模锻行业的生产水平，我国自主开发的蒸空锤改液气锤的换头改造技术的成功，为锤模锻技术改造开辟了新的途径，蒸空锤改液气锤具有节能效果显著，生产环境改善，锻件精度提高等优势，目前我国改造应用的液气锤技术，在可靠性和实际应用方面的实践工作还有待于进一步加强。

④ 强化模锻生产机组的配套水平。电液锤、螺旋压力机、热模锻压力机、对击锤、大型蒸空模锻锤等成形设备，本身制坯能力差，或者根本无制坯能力。配以辊锻机或楔横轧机、辗扩机等，使锻造预成形工序完善，提高锻件质量，提高模具寿命，提高生产率，节能节材。

⑤ 坚决淘汰燃煤加热炉，推广中频感应加热。锻造加热采用中频感应加热，锻造温度易控制且准确、可靠，加热时间短，氧化皮少，节拍稳定，有利于提高锻件尺寸精度，减少模具磨损，实现机械化生产，节能效果显著。煤炉加热燃耗大约在 0.6~0.8 t标煤/t 锻件，而中频感应加热的电耗为 400~600 kWh/t 锻件，等价折标煤为 0.16~0.20 t标煤/t 锻件，仅为煤炉加热能耗的 27%，节能 70%以上。同时煤炉加热质量低，温度不易控制，烧损氧化严重，锻件余量公差大，达不到节能节材的效果，同时煤炉加热产生 CO、SO_2、苯等有害气体，污染环境，危害人体健康，煤在燃烧和运输过程中产生烟雾和粉尘，污染环境，因此，锻造煤炉加热技术改造势在必行。

2）大力推广应用精密锻造技术　在汽车、摩托车、家用电器等行业中大力推广应用冷、温、热挤压精密模锻、闭塞锻造及复合工艺技术。对此，技术发展的重点如下：

① 定点钢厂研制生产冷、温锻件用钢材，要求钢材具有良好的、稳定的冷、温锻成形性能，实现批量生产，满足国内冷、温锻造需要。

② 尽快实现冷、温锻模具材料国产化。由于冷、温锻模具材料十分昂贵，通过采用电渣重熔方法对废旧模具进行重熔精炼，达到模具材料资源回收，降低成本，有利环保的目的。

③ 冷、温锻模具寿命是制约冷、温锻工艺应用的瓶颈，而模具的热处理和表面处理则是影响模具寿命的重要技术关键，尤其是模具表面强化处理（PVD），至今在我国尚处于空白，应列入行业重点技术攻关项目。

④ 开发冷锻毛坯表面处理新工艺，研制温锻用“绿色润滑剂”，以取代对环境有污染的石墨润滑剂。

⑤ 加快冷、温锻用锻压设备，提高冷、温锻压机性能及其自动化水平。



3）发展现代化锻造设备和模具制造设备　根据我国汽车工业发展的规划，在 2005～2015 年期间，汽车年产量达 500 万～850 万辆，轿车比重将增加到 50%～60%，高质量模锻件年产量达 120 万吨，农用汽车、摩托车、基础件行业的需求，未来 5～10 年时模锻件的年产量将增加到 210 万吨。因此要充分认识，并抓住市场机遇，有步骤有目标地发展锻造设备的生产和开发。

（3）冲压技术与冲压模具的发展思路

1）基本发展思路　现代冲压成形发展的一个特征是更新传统冲压方法，突破原有加工模式，采用新的能源和能源传递形式；在改善和提高原有技术水平的同时，开发出新的工艺方法和新的成形技术。随之所带来的是：对冲压模具提出更新和更高的技术要求，模具精度在 10 年前是 5 μm，现在是 2～3 μm；高档次模具：汽车、飞机微米级，磁盘、磁鼓亚微米级，超精密加工已进入纳米级。面对这一发展形势，冲压模具企业将在模具设计、模具结构、模具材料、表面工程技术、模具制造技术的发展方面作出努力。模具行业必须以高度集成化、智能化、柔性化和网络化与之应对。提高产品质量及生产效率，缩短设计及制造周期，降低生产成本，最大限度地提高模具制造业的应变能力，满足用户需求。

冲压模具业和整个制造业，在当今世界经济的大环境中，如何求生存，如何求发展，虽然没有现成的道路可走，但应该会有共同的规律可循。寻求行业生存的目的首先一定要明确相应的价值取向，寻求发展的方向应该适应人类社会的根本利益。当前冲压模具行业的发展需要做的两件主要事情是：企业自身的建设改造和行业结构关系调整。就企业自身的建设改造而言，可以通过图 1.0-2 所示模型来进行分析思考。由人、工具、材料、产品构成制造业的基本运行模式，无论是传统制造方法还是现代先进制造技术都应该是在这一模式之下运行。人通过使用工具将材料加工成产品，产品生产的最终目的是为人服务。要想获得好的产品，当然就需要有高素质的人才，需要有高水平的软、硬件工具和相应品质的材料。企业的建设改造也就是从这几方面入手。不过，在当代经济建设和发展中，首先必须考虑与自然环境的关系。因此，在图示的模型中，将自然环境放在了重中之重的中心位置，自然环境实际上也包括人文环境。如对人的培养和使用，应该是提高人的智慧、能力的技术水平，而不是使之成为机器。冲压模具制造作为一种先进制造技术，必须以提高行业的综合效益（包括经济效益、社会效益和环境生态效益）为目标，在重视自然、人文环境的前提下建设改造模具企业，才能做到体现人类社会可持续发展战略。这样的发展对社会才有意义！

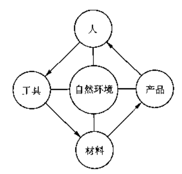


图 1.0-2　制造业模型

模具企业要提高在开放的环境中与国外的企业在同一市场上展开竞争的能力。加强人才培养，提高管理水平，提高职工的工作积极性；吸收和引进国外先进技术和先进手段，增加科学技术方面的投入，选择优良品质的材料，尽量提高产品的技术含量；提高生产率，抓好模具产品的质量，保证模具准确的交货期。从制造业的几个环节中加强实力，练好企业的内功，才可能在将来的模具市场中立于不败之地。

由于日本、台湾、新加坡等地的制造业生产据点外移呈不可逆转的趋势，在日本、台湾等地区，制造业及模具生产已经开始下滑。自 1998 年以来，日本模具生产呈现连续衰退现象，2000 年上半年日本模具的生产金额为 2 188 亿日元，比 1999 年同期减少 4.8%，产量同期也减少了 5.9%。而台湾地区模具业自 1999 年以来也是连续下滑，2000 年模具产值降为新台币 481.4 亿元，比 1999 年年衰退 9.5%。中国有优秀的人才，模具钳工技术水平高，劳动力成本低。我国模具的价格要比许多工业发达国家低得多，有的甚至只有国外价格的 1/3～1/5，我们应该很好地把握国际市场上的这一有利形势，尽快提高国内模具技术水平。模具企业要靠技术和质量立足，提高模具的技术水平、接受最新的模具技术，应用在国外已经成熟的新技术，如超大型模具、超高精度模具、高速多工位级进模、快速经济模具技术等和快速成型（RPM）、反向工程技术（RE），应用性能更佳的模具钢，高速切削加工等先进加工技术。继续配备一些先进的数控制模设备，利用 CAD/CAE/CAM 等先进技术设计制造模具，缩小与国际水平差距；同时提升管理水平，提高模具加工质量，缩短生产周期，通过模具企业有效的建设改造，以我国模具业在成本上的优势，迎接挑战，变挑战为机遇，进而扩大模具出口。

2）冲压模具发展的重点　模具日趋大型化，模具的精度将越来越高，多功能复合模具将进一步增加，标准件的应用将日渐广泛。模具技术含量将不断提高，中、高档模具比例将不断增大。汽车覆盖件模具，精密冲压模，波纹管挤出模及管接头模具，多工位冷锻模及冷挤模，壳体连续拉伸模，新型快速经济模，主要模具标准件、拉丝模等成为冲压模具行业重点发展的产品，这是模具市场走势的变化。

① 用高新技术改造传统模具技术。用信息技术等高新技术改造模具企业的传统生产技术是必然的趋势。因此，CAD/CAE/CAM 技术的进一步推广应用，发展快速原型制造和快速模具制造技术，高速铣削和超精加工及复杂加工的进一步采用，模具标准化程度的不断提高，优质模具材料的开发和采用及先进表面处理技术的发展以及可能范围内虚拟技术、逆向工程和并行工程的采用等，都将是模具行业技术的发展趋势。在模具产品质量方面，主要是提高精度和使用寿命。同时产品将继续向大型化、精密化、多工位复合和高效化方面发展，大力缩短产品生产周期将被提高到越来越重要的位置。为此，模具生产企业应着重于创新，努力采用高新技术，大力提升产品水平和档次，进一步缩短产品生产周期，以提高在市场上的竞争力。

模具行业之间应该加强交流与合作，需要有经济和规范的组织引导，改变当前模具行业不同程度地停留在无序发展的局面，使模具企业间优势互补、互相促进。新技术、新工艺、新材料、新经验需要得到及时推广应用，以提高模具行业的整体素质。

为适应市场对产品多品种、小批量、更新换代快的需要，快速原型制造技术、表面成型制模技术、浇铸成型制模技术、挤压成型技术、无模多点成型技术、钢带冲裁落料制模技术应该得到充分的重视，并且进行研究开发和广泛应用。

② 冲压模具专业化、标准化。实现专业化生产，是模具企业成功的基础。大部分模具企业的生产能力有限，而模具的加工设备投入又很大，不可能也不必要每个模具企业都做到“大而全”、“小而全”。模具企业应该实行各尽所长，

各尽其能，联合发展，共同依存。模具企业要确定自己的产品定位和市场定位，做“专”做“精”。推行模具专业化生产，是我国模具行业发展的一条可行之路。当然模具企业是一个完全面向订单市场的行业，没有足够的市场订单保障，模具专业化生产改造速度必然受到影响。

模具标准化是现代模具设计与制造的基础。推行模具标准化是实现模具合理化生产的必备条件。美国、德国进行模具标准化工作已有 100 年的历史。日本在二战后，也进行了全面推行模具标准化工作。这些国家已全面实现了模具标准化。其中，中小型模具中 90%以上的零、部件，中大型模具中 60%以上的零、部件，均已实现了标准化、通用化、系列化和商品化供应。日本、美国模具的平均生产周期已缩短到 1.5~2.5 月，而我国模具的平均生产周期在 4~5 月以上，其主要原因之一是模具标准化程度和水平不高。

我国模具标准化工作起步较晚，由于模具标准件品种规格少、供应不及时、配套性差等问题长期存在，从而使模具标准件使用覆盖率一直较低。近年来虽然由于外资企业的介入，比例已有较大提高，但总的来说还很低。据初步估计，目前这一比例大致为 40% ~ 45%之间。而国际上一般在 70%以上，其中中小模具在 80%以上。近年来经过努力，冷冲模架等的生产集中度与使用覆盖率虽已大幅提高，但现状与市场需求相比仍有较大差距。尤其是中低档产品多，中高档产品少，一些外资企业生产的高档模具标准件，由于价格昂贵也影响了推广与应用。

我国模具标准件产品的生产现状是：冷冲模架是量大面广的模具标准件之一，其使用覆盖率达 80%左右。目前，全国生产冷冲模架并已有一定规模的企业共有 30 多家，其中年产 10 万套以上的只有 3 家，这 3 家企业的冷冲模架年产量共计约 40 万套，约占全国总量的一半。从需求情况看，全国每年约需冷冲模架 100 万套左右，因此还有很大缺口。其中钢板模架和精密模架产需矛盾最大，因而自产自配比例也最大。

有关统计资料表明，采用模具标准件可使企业的模具加工工时缩短 25% ~ 45%、能缩短模具生产周期 30% ~ 40%，而且能有效提高模具质量。目前，我国生产供应的标准件品种规格不齐，质量不高，不能满足互换性要求，从而造成我国模具生产水平，仍基本上处于极不合理的单件生产状态。为此，应当采取相应措施，针对模具生产特点，组织行业力量，使标准件“快捷、适时、定点、优质、安全、配套”地对模具生产企业进行商品化服务，以全面推行模具标准化工作。

我国“十五”模具行业发展规划提出：模具标准件要扩大品种，提高精度，达到互换。其中主要品种，如模架、导向件、推杆、弹性元件等，要实现按经济规模大批量生产。2005 年模具标准件使用覆盖率达到 60%，2010 年达到 70%以上（其中大型模具 60%零件实现标准化），基本满足市场需要。模架、导向件、推杆、推管、弹性元件、标准组件、小型标准件（如标准凸凹模、浇口套、定位圈、拉钩等）是发展重点。由此可见模具标准化及模具标准件方面的任务艰巨。今后需要加速建立、完善模具标准体系，使标准件产品参数化，以满足标准件规模生产和模具数字化设计与制造的要求；提高模具标准件商品的制造精度与质量，以保证使用技术安全和互换性要求；研究、设计标准件新品种，并使之系列化、参数化，满足模具结构设计要求；规范标准件市场，规范标准件商品的精度、质量和价格。中国模具工业协会标准件委员会提出：标准化是基础，专业化是方向，商品化是关键，这是模具标准化工作的指导思想。模具标准件行业需加速增强竞争实力。

编写：夏巨谌（华中科技大学）



参考文献

1 中国机械工程学会锻压学会，中国机械工程学会锻压学会第五届学术年会，论文集，1991

2 中国机械工程学会锻压学会，中国机械工程学会锻压学会第六届学术年会，论文集，1995

3 中国机械工程学会锻压学会，中国机械工程学会锻压学会第七届学术年会，论文集，1999

4 中国机械工程学会锻压学会，中国机械工程学会锻压学会第八届学术年会，论文集．北京航空工业出版社，2002

5 夏巨谌．精密塑性成形工艺．北京：机械工业出版社，1999

6 北京机电研究所．锻压（国外机械工业基本情况）．北京：机械工业出版社，2002



第2篇

锻造成形

主　编　夏巨谌　郭会光

编　写　郭会光　夏巨谌　李　梅
陆东元　吴听松　瞿　良
蔡喜明　赵一平

审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



锻造成形是塑性成形工程的重要组成部分，在整个工业生产中占有举足轻重的地位。工矿交通各行各业，如汽车、拖拉机、机床、矿山机械、动力机械、航空航天、舰船与兵器等产品中的曲轴、光轴、连杆、前轴、半轴、涡轮盘、叶片、喷嘴、中高压阀体与管接头、转子、叶轮、圆盘、护环、齿轮及轴承套圈等，承受重载、冲击载荷或高温、高压的关键零件的毛坯或成品零件，无不采用锻造成形的方法来生产。因而，锻造生产能力及其工艺水平，对于一个国家的工业、农业、国防和科学技术所能达到的高度，影响很大。

(1) 锻造生产企业概况

目前我国已有的不同规模和不同隶属关系的锻造企业大约6 500家。在大中型综合性机械制造企业中，都有不同等级和规模的锻造分厂（或车间），主要承担本厂的锻件生产，为本厂产品配套，专业锻造企业较少，因此锻件商品化程度较低。

我国是一个农业大国，随着乡镇企业异军突起的发展形势，锻造行业在乡镇也勃然兴起。据"九五"期间的调查，确认全国锻造厂点10 000余家，除去60%的国有厂家外，乡镇锻造企业有4 000多家。全国锻造行业的骨干企业有350多家，锻件产量占全国锻件产量90%以上。中外合资或独资锻造厂20家，年生产锻件为30 000多吨。每年我国出口锻件大约5 000多吨。初步估计，全国锻造行业从业人员20余万，专业技术人员12 000多人。

(2) 锻件产量及分布情况

根据调查和测算，全国2000年的锻件总产量为263万吨，其中模锻件为165万吨，锻件的主要市场为汽车、农用汽车、基础件工业，以及石油通用机械工业、重机矿山、机车车辆工业等。近年来汽车、摩托车、农用车的产量以及机械行业的发展势头使锻造行业的产量仍保持逐年上升的趋势。根据我国锻造行业的技术构成以及我国汽车产量载重车比例高的特点，按汽车、农用汽车的产量可较为准确地测算模锻件的产量和钢锻件的总产量，参见表2.0-1。自2002年起，我国汽车制造工业进入快速发展时期，汽车锻件也随之快速上升，初步估计，2003年，我国锻件产量已超过300万吨。

表2.0-1 汽车、农用车产量和锻件产量

产量 \ 年份	1997	1998	1999	2000	备注
汽车产量/万辆	158	163	183	207	
农用车产量/万辆	260	272	280	298	还需进一步核对
汽车用模锻件/万吨	42	43	45	48	
农用车模锻件/万吨	46	47	48	48	
模锻件总量/万吨	150	154	157	165	
锻件总量/万吨	253	257	260	263	自由锻件估计变化不大

表2.0-2 世界各主要锻件生产国产量 万吨

年份 \ 国别	中国	日本	北美	德国	法国	美国
1994		270	171		38	17
1995		284	191	178	40	29
1996		282	195	176	37	32
1997	253	289	208	189	42	
1998	257	247	202	206	44	
1999对 260	237					
2000	263			218		

我国汽车产量不是世界大国，但是汽车生产总量中载重车和客车占70%以上，农用汽车和摩托车的产量居世界前列，整个机械行业处于稳定增长的势头，所以我国锻件总产量也逐年同步稳增。全世界年产锻件约1 450万吨，我国约占25%。从世界各主要锻件生产国家的锻件产量资料显示，目前我国锻件总产量已居世界第一，详见表2.0-2。

我国锻件产量虽然居世界之首，但锻件中模锻件约占60%。而德国、日本、美国等模锻件占80%~88%，日本精锻件年产量达70万吨，占锻件总量的30%；冷锻件（不含标准件）所占比例德国为9.3%、日本为5.9%，法国为16.2%，有色金属和铝合金模锻件也占有相当的规模。我国热精锻件和冷锻件所占比重甚微，估计为5.2%。从锻件构成比例来看，我们只是锻造大国，而不是锻造强国。

(3) 锻造设备的基本状况和水平

我国现有锻造设备30 000台，其中，自由锻造设备26 500台，占锻造设备总数的88.3%。

自由锻锤26 400台，最大50 kN。

自由锻液压机100台，最大125 MN。

模锻设备3 500台，占锻造设备总数的11.7%。

按品种划分的最大模锻设备是：

160 kN蒸汽模锻锤；

100T~M对击模锻锤；

112 MN螺旋压力机；

AMP70多工位高速自动热镦锻机；

10 MN肘杆式冷锻压力机；

315 MN模锻水压机；

6.3 MN摆辗机；

100 MN多向模锻水压力机；

125 MN热模锻压力机；

25 MN摩擦压力机；

320 KJ电液对击锤；

20 MN平锻机；

14 MN径向精锻机；

ϕ5 500辗扩机；

125 MN卧式金属挤压机；

ϕ1 200楔横轧机；

16 MN多工位温锻压力机。

从以上我国锻造设备的基本构成可以看出，锻造设备中蒸汽锻锤27 500台（自由锤+模锻锤），占锻造设备总量的92%。模锻设备中，原有蒸汽模锻锤1 100台，占模锻设备31.4%；摩擦压力机1 300台，占模锻设备37.0%，机械热模锻压力机120台，仅占3.4%。应该说我国的锻造设备整体质量性能水平不高，落后的设备多，先进的设备少，同发达国家的差距较大，我国的锻压设备从整体上处于更新换代的发展阶段。

(4) 锻造生产工艺水平

1) 大锻件生产工艺水平 大锻件通常是指以铸造钢锭为毛坯，在大于10 MN锻造液压机上采用自由锻方法锻造而成的锻件。由于重型机械、发电设备、国防工业、石油化工、船舶制造业、机车车辆集中的关键大型零件均为大锻件，因此大锻件生产水平常被视为国家经济实力和机械工业发展的重要标志之一。通过多年的发展，特别是改革开放以来的努力，我国大锻件行业的面貌有了很大改观，达到了一定的生产规模和水平，且拥有的125 MN级大型锻造液压机数量，居世界第三位，仅次于美国和俄罗斯。20世纪80年代我国从日本、美国、德国引进了大型锻件生产技术，如300 MW及600 MW电站设备的制造技术，大型容器及管板产品的大锻件生产技术，使我国大锻件的生产工艺水平有了较大的提高，基本上掌握了一些国外先进的锻造工艺方法，

例如JTS（中心压实法）、WHF（对称平砧锻造法）、FM（不对称平砧锻造法）、FMV（不对称V型砧锻造法）、筒体及环件制造的三点砧锻造法、大直径带锥锻筒体收口锻造法等。燕山大学和沈阳重机厂合作开发了发电机转子用护环外补液压胀形法，制造了370 MN框架式护环液压胀形机。天津重机厂、第一重机厂、资阳机车厂分别开发了大型柴油机全纤维曲轴的TR与RR法镦锻工艺。此外国内还开发了管板类锻件生产新方法。就目前的大锻件生产水平来说，能够为320 MW（高中水头）水电机组，600 MW核电机组，4 200 mm特厚板轧机，300 MN模锻水压机及125 MN自由锻水压机，120 MN热模锻压力机，排水量70 000 t级船舶，单重900 t炼油用加氢反应容器，轴承用ϕ5.5 m环形组件，23 m^{3}矿用挖掘机等装备提供成套大锻件，不仅基本上满足了国民经济各部门发展与装备自身的需求，而且还能向国外提供如300 MW核电机组及火电机组成套锻件，轧辊及轧钢设备用锻件，大型柴油机全纤维曲轴锻件，已具备走向国际市场的能力。

2）普通模锻工艺水平　普通模锻件通常是指在锤上，热模锻压力机（包括平锻机）和螺旋压力机上的模锻件。在我国当前锻造行业中，设备是质量最主要的工艺手段。长期以来，锻造工艺就其本身而言，国内外在这一领域并没有取得突破性进展。但是由于锻造行业的高成本、高能耗、高劳动强度、高环境污染的特征，促使人们不断为克服和改善这些问题而努力探求新的途径和手段，借助更新锻造设备，改造提高锻造工艺技术。

近10多年来，我国热模锻生产随着汽车、农用汽车等车辆的不断增长而同步发展，锻造技术水平有了较大的提高，模锻设备的构成有了明显的变化，热模锻压力机、摩擦压力机、高能螺旋压力机增加较快，并且是以组线生产为主，具有一定的机械化自动化生产水平。例如一汽锻造厂技改项目125 MN曲轴、前轴热模锻生产线，济南汽车厂63 MN转向节锻造生产线，仅汽车制造厂和配套件厂就增加热模锻压力机50余台套，特别应该指出的是这些生产线设备中有许多都是国产，而且锻造工艺装备和连线技术都是由国内厂、所联合研制完成的，标志着我国热模锻技术提高到了一个新的水平。

由于历史的原因，我国模锻生产至今仍以锤锻为主，而且遍布全国总数约1 100台。由于锤模锻生产的高能耗，高劳动强度和高污染，使得电液锤应运而生。电液锤和蒸空锤的电液锤动力头改造，在政府和中国锻协的积极组织下，取得了很大的进步，同时以引进的电液锤组成的锻造生产线，也使热模锻生产工艺技术有了新的提高。例如白城精锻厂和南宫曲轴连杆厂先后从德国BECHE引进了50 kJ和25 kJ的电液锤和相应的配套设备，建成连杆锻造生产线，锻造连杆的质量和精度达到了轿车锻件的技术要求，实现了轿车连杆生产的国产化，同时也使锻造工艺设计、模具制造以及锻件质量检测和控制有了新的进步。1999年起，浙江万向钱潮公司先后从德国LASCO公司进口了50 kJ、80 kJ和100 kJ的电液锤生产十字轴锻件，十字轴万向节分别出口美国、欧洲等国家，给主机厂直接配套，开创了我国锻造产品（汽车零部件）在海外市场直接为主机厂大批量配套的先河。安庆百协精密锻造公司也从德国BECHE公司进口了100 kJ电液锤及其相关设备，建成精锻汽车转向节生产线。

除了锻锤，我国另一类主要模锻设备为螺旋压力机，而且是国产的双盘摩擦螺旋压力机。这种设备投资少，见效快，但生产的锻件在保证产品精度和质量方面存在严重缺陷。为此，从20世纪80年代起，我国开始引进了新型螺旋压力机，这些设备目前主要集中在航空、机车、叶片等制造领域的企业。为了满足国内其他产业企业的需要，北京机电研究所和青岛锻压机床厂在模仿基础上，共同开发研制了带离合器的螺旋压力机，该机具有打击能量高、合模时间短、模具寿命长、锻件精度高等优点，这标志着我国使用螺旋压力机进行模锻迈上了一个新台阶。

热模锻生产工艺的技术进步，不仅表现在模锻本身工艺水平和锻造能力的提高，还表现在锻造成形复合工艺技术的开发应用。例如精辊预成形和模锻工艺相配匹生产锻件，湖北三环车桥公司投产的前轴精辊制坯——螺旋压力机整体热模锻生产线，其辊锻模锻复合工艺技术和2 500 t高能螺旋压力机、ϕ1 000 m辊锻机，以及锻造机械手都是由国内自主开发制造，该生产线能够锻造120 MN热模锻生产线锻造的前轴，而投资仅为后者的1/5，在小批量、多品种和劳动力廉价的今天，无论锻造生产工艺水平，还是经济效益，与国内外同类锻件的生产相比无疑是一个值得注意的尝试。

模锻生产工艺技术和装备以及坯料加热、模具制造等，虽然取得了显著的进步，发展趋势良好，但是就模锻行业的整体水平而言，与国外发达国家的水平相比，我们仍然是发展中国家的水平。

3）精密锻造技术的进步　精密锻造是指以金属体积塑性成形的方法获得表面光洁、尺寸精确的制品的锻造工艺，诸如冷挤压、温挤压、热挤压、热精密模锻、冷精密模锻、闭式锻造等，这些成形方法统称为精密锻造。

精密锻造工艺得到的锻件，不仅表面质量和尺寸精度高，同时锻件的净形率（制品重量/锻件重量）很高，后续机械加工很少，或者无需后续机械加工，国外目前也把精锻称为净形（net shape）或近净形（near net shape）加工技术。

在大批量生产条件下，冷挤压和冷锻是一种优质、高效、低成本的先进生产工艺，在国外发达国家的汽车、摩托车、家电制造行业中得到广泛应用。在日本和德国每辆轿车冷锻件的重量达56 kg，占轿车零件的30%～40%。

我国冷锻技术（包括温锻）在20世纪70年代曾一度得到广泛推广，但由于产品数量达不到经济批量，因而未能持续发展而转入低谷。在其后的80年代，随着轿车和家电、摩托车业的发展，为冷锻工艺提供了新的发展机遇。上海第一汽车附件厂、大丰自行车飞轮厂（即现江苏森威集团）、天津汽车锻件厂、大连洗衣机厂、青岛手表厂都先后从日本和德国引进了冷锻压力机，用以生产汽车活塞销、DOJ型等速万向节、摩托车齿轮和花键轴、自行车中轴、调速壳、手表壳等零件，此时的温锻工艺仅在轴承行业的一些厂得以继续应用。但由于我国冷温锻造的市场小，以及冷温锻工艺体系发展不完备，诸如冷锻钢材、模具技术、冷锻设备等的欠缺，冷温锻工艺规模化生产的企业屈指可数。

20世纪90年代以来，随着轿车、摩托车产量的快速增长，冷温锻工艺生产的市场得以扩大，国家在“九五”科技攻关项目中加大了对冷温锻复合工艺研究的支持，厂所合作对BJ型等速万向节外壳温、冷锻复合工艺进行了开发研究，并获得成功。目前江苏森威集团已建成由500 kW中频感应加热炉，10 000 kN冷锻液压机（1台），4 000 kN（2台）和6 300 kN（2台）肘杆式压力机组成的冷温锻生产线，能够采用冷锻或冷温锻复合工艺生产DOJ型和BJ型等速万向节外壳，年产120万件，DOJ型筒形壳内沟槽不再机加工，BJ型球冠内构槽仅0.3 mm余量。该厂还自主开发了轿车变速箱轴的冷挤压工艺，并能生产符合DIN标准的冷锻输出和轴人轴；采用气动式闭式锻造模架在冷锻压力机上生产等速万向节的内套和三销轴，年产100余万件。江苏太平洋公司对同步器结合齿轮的冷锻开发成功，并且投产。中国冷温锻造的发展，也引起国外企业的重视。近几年，丰田汽车公司在天津建成了天津丰田汽车锻造部件公司，采用冷温锻工艺生产等速万向节精锻件，年产100万套，用以温锻的1 600 t多

工位自动传送压力机，年生产能力达400万件。与此同时，上海纳铁福公司从德国SCHULLER公司引进了1 600 t全自动温锻压力机生产线，主要生产轿车等速万向节外壳精锻件，年产300万件。这无疑是对国内精锻行业的巨大冲击，应该说冷温锻行业面临严峻的挑战。

热挤压多用于钢厂的合金钢无缝钢管的生产，以及高压气瓶及特种合金棒料的生产上。由于改进热挤压工艺润滑剂和提高模具寿命的技术难度大，在机械行业、汽车制造业中的应用较少，目前只有少数几家阀门厂引进了设备，用热挤压和热镦锻复合工艺生产发动机进排气门毛坯。由于热挤压模具寿命不变和设备造价较高等原因，影响了该项工艺的推广应用。但近年来，这两个关键问题正在取得突破。

我国开发齿轮热精锻工艺较早，弧齿锥齿轮、直齿锥齿轮、同步器齿环的精锻生产对设备要求不高，在摩擦压力机上就能满足工艺要求。同时国内还引进了闭塞锻造模架和用于齿轮冷温精锻的压力机。因此目前还没有受到国际齿轮精锻业的挑战，发展趋于稳定增长的势头。

高速热镦锻是指在高速自动热锻机上进行的热精锻工艺，具有生产效率高、锻件精度高的优点。20世纪80年代以来在我国高速镦锻工艺发展的基础上，韶关铸锻厂引进了瑞士HATEBURE公司AMP30、AMP50高速镦锻机生产线，取得良好的效果。后来，一汽引进了AMP70高速镦锻机生产线，用以精锻轿车齿坯，同时亦可精锻CVJ外壳、内套、三销轴、十字轴等轿车、摩托车零件。高速热镦锻在中小精锻件的生产中，也是一种高效精锻工艺。另外，高速自动热镦锻机在轴承行业得到大的应用，国内有一定的技术基础，可根据市场需求，着力投入开发研制。

(5) 今后的发展方向

自我国加入WTO以来，因我国的基础设施良好、劳动力资源丰富及劳动力价格便宜等有利条件，工业发达国家纷纷将本国的制造业向中国转移，中国正在变为“世界工厂”。同时，随着我国汽车及零部件制造工业的快速稳定发展，加之汽车零部件跨国集团公司全球采购的态势，中国被界定为世界或区域性汽车零部件生产基地。这些都为我国锻造工业的发展带来了大好的机遇。为了适应这一形势，我国的锻造生产及锻造技术应沿着如下方向发展。

1) 推广应用已有的精锻技术，同时开发汽车及航空航天等关键零件的精锻技术，对于大中型锻件提高精化毛坯的比例，对于汽车尤其是轿车锻件着重提高中小锻件采用冷精锻技术实现净形生产的比例。

2) 推广应用CAD/CAE/CAM技术，加速开发大型、复杂精密锻件及模具的专业化水平集成软件，实现工艺与模具设计的自动化及工艺的优化。

3) 开发高性能模具材料及现有模具材料的热处理新技术，研究模具失效机理并摸索提高模具寿命的有效措施，使模具使用寿命得到较大幅度的提高。

4) 研制通用和专用精密锻造设备、上下料机械手、快速传递输送装置及快速模锻机构、操作机器人，建立专业化、自动化生产线，实现大规模生产，提高生产率。

第1章 自由锻造工艺及其装备

本章主要叙述钢铁材料和有色金属合金的自由锻造工艺要点，同时介绍有关锻造工具的结构与特点，以及锻压设备的选用知识。

1 自由锻造工艺

通常把采用简单通用的工具（如平砧、型砧）使坯料或铸锭产生塑性变形，从而得到所需的形状尺寸和良好组织性能锻件的塑性加工方法，称为自由锻造。依据加载方式和使用锻压设备的不同，自由锻可分为手工锻造、锤上自由锻和液压机上自由锻，前者主要用于制造中小型锻件，后者则多用于大型重要锻件。自由锻造方便、灵活，工装简单，工件变形抗力小，广泛应用于试制、修理、单件小批生产。但是，对大型关键锻件的生产，自由锻造是主要的塑性加工技术。

1.1 自由锻造的基本工序

自由锻基本工序有镦粗、拔长、冲孔、弯曲、扭转、切割和锻焊等。在大型锻造中还有芯棒拔长、芯棒扩孔等，而切割与锻焊已为相关技术所取代。

（1）镦粗

使坯料高度减小，横断面积增大的锻造工序叫镦粗。

镦粗是制造饼、块、盘类锻件的主要变形工序，是空心锻件冲孔前的准备工序，是轴、杆类锻杆需要增加后续拔长变形程度的预备工序。镦粗可提高锻件力学性能，减少异向性。反复镦粗拔长又能破碎铸造组织，改善高合金钢中碳化物的形状和分布。

常见的镦粗方法有：

1）平砧镦粗　如图2.1-1所示，坯料在平砧间整体受压，整体变形。由于坯料与砧面接触摩擦的影响，工件各处变形分布并不均匀。圆柱毛坯（$H/D\approx1$）在平砧间镦粗时，外径呈单鼓形，中段变形较大。由计算机仿真显示的内部变形分布和温度分布如图2.1-2所示。其应力与应变分区大致如图2.1-3所示。上下端为Ⅰ区，摩擦影响大，温度低，变形最为困难，称难变形区。该区容易保留铸态结构。中部为Ⅱ区，因摩擦影响小，温度高，塑流剧烈称大变形区或易变形区。该区呈明显的锻态组织特征。周边为Ⅲ区，变形程度介于以上两区之间。但由于Ⅱ区变形金属向外流动对Ⅲ区径向施压，因此该区有切向拉应力出现，所以坯料表层可能产生纵向裂纹等缺陷。

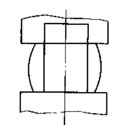


图2.1-1　平砧镦粗

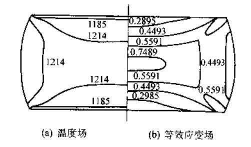


图2.1-2　圆柱毛坯镦粗时内部温度场与等效应变场

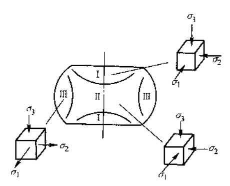


图2.1-3　镦粗分区应力应变状况

毛坯高径比是影响镦粗变形的重要因素之一，当高径比增大（如 $H/D>2$）镦后工件两端部呈双鼓形。继续增加高径比（如 $H/D>3$），则镦粗时会发生失稳纵弯曲。当高径比很小（如 $H/D<1$），则镦粗时两端难变形区相碰撞，内部会产生横向附加拉应力及空隙性缺陷。

2）垫环内镦粗　如图2.1-4所示，比如锻造带凸台的齿轮、突缘类的锻件时，采用带中孔的垫环压出轮缘，挤出凸台。

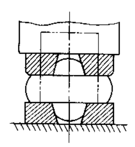


图2.1-4　垫环内镦粗

3）镦头　如图2.1-5所示，长杆件镦头系局部镦粗。如地脚螺栓和汽车半轴都用局部镦粗成形。

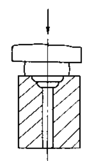


图2.1-5　局部镦头



4）带钳把镦粗 在水压机上用钢锭锻造大型轴类件时，需先锻出夹持钳把，于是后续镦粗称为带把镦粗，如图 2.1-6 所示。按上镦粗板和下漏盘工作面形状不同又可分为平面镦粗、凹面镦粗与凸面镦粗。

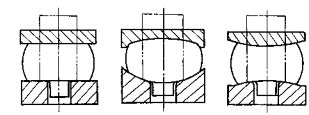


图 2.1-6 带钳把镦粗的三种型式

图 2.1-7 表示了凹面和凸面镦压 40%后，锻坯内等效应变和静水压应力的分布情况，可见凸球面镦粗比凹球面镦粗好，平面镦粗的应力应变场介于上述两者之间。

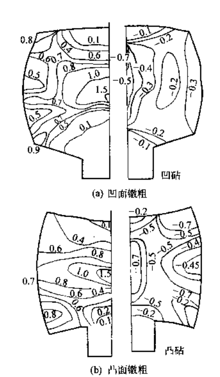


图 2.1-7 带钳把镦粗坯料内应力应变场

为了防止镦粗时失稳弯曲，坯料高径比不应大于 2.5～3。

为了保证中部有良好的压实效果，不仅压缩量要足够（$\varepsilon_h > 30\% \sim 40\%$），而且加热温度要高，分布还应均匀。

为了防止铸锭镦粗时侧表面裂纹，钢锭镦粗前最好先进行轻压倒棱，消除表面缺陷。

锤上镦粗时，应满足如下方程以充分发挥锤击能量。

$$H_x - H_0 > 0.25H_x$$

式中，H_x 为锤头的行程；H_0 为毛坯原高度。

（2）拔长

使毛坯长度增加面横断面减小的工序称拔长。

拔长是应用最多的锻造工序，它不仅是轴杆类锻件的主变形工序，面且是改善锻件组织结构，提高力学性能的重要手段。

影响拔长效果和生产率的主要参数有砧型、摩擦润滑状况、加热后坯料的温度场、坯料及砧面的相关尺寸。常用砧型有平砧、V 型砧、圆弧砧等。与拔长塑性变形区有关的尺寸及其相对比值有：送进量 L，压下率 $\varepsilon_L = (H_0 - H)/H_0 \times 100\%$，砧宽 W，料宽 B，料高 H，相对送进量 L/H，砧宽比 W/H，料宽比 B/H，进料比 L/B 等。面摩擦、润滑及加热毛坯的温度场，对拔长时金属流动和变形均匀性都会产生影响。

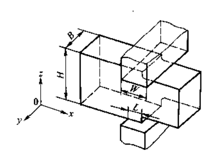


图 2.1-8 平砧拔长矩形截面毛坯

1）平砧拔长矩形截面毛坯 如图 2.1-8 所示，当进料比为 $L/B = 1$ 时，虽然毛坯与砧面接触部分为正方形，但每次压下后由于两端不变形部分（外端）的约束，坯料横向展宽要小于纵向伸长。面由于接触面外摩擦的影响，端部（图 2.1-9A-A）中心延伸小，边部延伸大，面轴线（O-O）中心变形大，边部变形小。

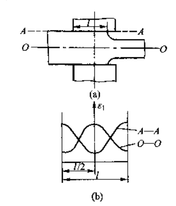


图 2.1-9 拔长时的变形分布

当进料比过大，拔长时容易产生外表横向裂纹、角裂和内部对角线裂纹，如图 2.1-10 所示。当进料比过小，如图 2.1-11 所示，拔长变形仅集中于表层，面中心部分锻不透会产生附加拉应力，造成内部横向开裂，如图 2.1-12 所示。综上所述，进料比过大或过小都是不合适的，一般认为 $L/B = 0.5 \sim 0.8$ 比较适宜。

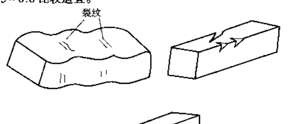


图 2.1-10 拔长时表面横裂、角裂及对角线裂纹



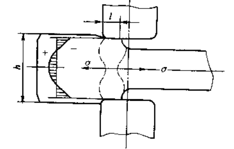


图 2.1-11 进料比过小毛坯变形和应力状况

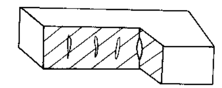


图 2.1-12 内部横向裂纹

由于拔长变形分布不均匀性和温度分布不均匀的影响，在锻造低塑性合金钢时，送进量要合理，锤击力不可过大，要勤翻转，不得在一处重复锻击，注意调控变形与温度分布的均匀性，防止产生拔长缺陷。

2）平砧拔长圆截面毛坯　平砧拔长圆截面毛坯，不仅拔长速度慢，而且内部会产生附加拉应力，形成裂纹破坏，如图 2.1-13 所示。因此，圆轴类坯料拔长可以采用两种方案。第一种方案是平砧拔长，如先方后圆拔长，即用平砧先将圆坯打方，然后倒角再打成圆，截面变化如图 2.1-14 所示。第二种方案是采用 V 型砧或圆弧砧拔长。平砧拔长圆毛坯从方到圆，较从圆到圆拔长效率和变形效果都好。但用圆弧砧拔长圆毛坯，因横向变形被限制，拔长效率比平砧要高。

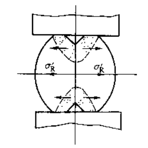


图 2.1-13 平砧拔长圆毛坯引起的附加拉应力图

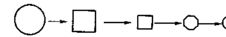


图 2.1-14 平砧拔长圆毛坯截面及形状的变化

常用型砧的种类主要有上平下 V 型砧、上下 V 型砧、圆弧砧等，如图 2.1-15 所示。

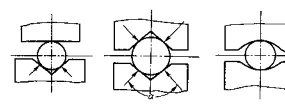


图 2.1-15 型砧类型

3）拔长时应注意的事项

① 每次锻压产生的变形应小于材料允许的塑性极限，否则可能产生锻造裂纹。

② 每步拔长后坯料宽、高方向的边长比，应小于 2～2.5，否则翻转 90°再锻压时会发生弯曲折叠。

③ 每次送进量与压下量之比（$l/\Delta h$）应大于 1～1.5，以防止产生折叠现象，如图 2.1-16 所示。

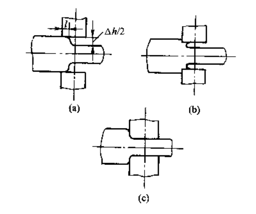


图 2.1-16 拔长时形成折叠的过程

④ 拔长低塑性材料，如高合金钢、工具钢及不易再结晶的材料，进料比应取较大值，如 $L/B = 0.75 \sim 0.8$，而且拔长时应该先轻后重，不得在一处重复锻击，注意错砧。翻料应用螺旋方式，最好使用型砧锻圆坯。

⑤ 钢锭倒棱或方料对角压缩，应该控制压下量，高温轻打，以防开裂破坏。

⑥ 为防止拔长时坯料端头产生凹心，一般圆形坯端部压料长度 $A > 0.3D$（如图 2.1-17a 所示）。对方形坯，当 $B/H > 1.5$ 时，$A > 0.4B$；当 $B/H < 1.5$ 时，$A > 0.5B$，如图 2.1-17b 所示。

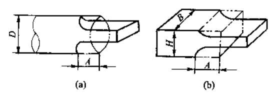


图 2.1-17 拔长端部时的压料长度

(3) 冲孔

在坯料中冲出透孔或不透孔的工序叫冲孔。

1）冲孔的方式　根据冲子的类型和冲孔方法的不同，冲孔分实心冲孔、空心冲孔和垫环上冲孔等。

① 实心冲孔。主要冲较小的孔。可以用冲子从一面冲孔，称为单面冲孔。也可以先用冲子从坯料上面冲到料高 70%～80%时，翻转 180°，再用冲子把冲芯冲脱，这种方法叫双面冲孔。如图 2.1-18 所示。

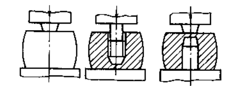


图 2.1-18 实心冲孔（双面冲孔）

冲孔前应先镦粗至 $H \leqslant D_0$。冲孔直径 $d \approx D_0/3$（D_0 冲孔前毛坯的直径）。这样冲孔方便且畸变较小。

③ 空心冲子冲孔。空心冲孔（如图 2.1-19 所示）主要用于大型空心锻件的冲孔（如 ϕ400 mm 以上的孔）。空心冲

孔不仅能冲掉钢锭心部缺陷，而且坯料形状变化不大，但是空心冲孔的芯料损失较大。

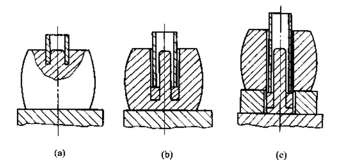


图 2.1-19 空心冲子冲孔

③ 在垫环上冲孔。这种冲孔方法如图 2.1-20 所示，一般用于在较薄毛坯上冲孔，例如当厚度 H 与孔径 D 的比值 $H/D<0.125$ 时，可用此法冲孔。在垫环上冲孔时坯料形状变化小，芯料损失也较大。

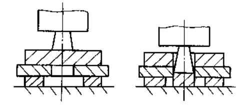


图 2.1-20 在垫环上冲孔过程

2）实心冲孔的缺陷 实心冲孔时坯料的变形特点是：冲头下面的圆柱区被压挤，一方面向下运动拉着周围圆环区金属下移使高度减小，另一方面径向流动对圆环区由内施压使其胀形并产生切向拉应力。鉴于冲孔时坯料的受力变形情况，因而容易产生如下缺陷：

①"走样"与裂纹。冲孔后坯料发生了大的变形，外形畸变称为"走样"。"走样"程度与坯料直径 D_0 和冲孔直径 d 有关。

当 $D_0/d\leqslant3$ 时，外径上小下大，直径扩大，底边上翘，高度拉缩"走样"比较严重，侧面可能产生裂纹。如图 2.1-21a 所示。

当 $D_0/d=3\sim5$ 时，几乎没有拉缩现象，外径变化较小，如图 2.1-21b 所示。

当 $D_0/d>5$ 时，由于环壁较厚，扩径困难，多余金属挤向端面形成凸台，如图 2.1-21c 所示。

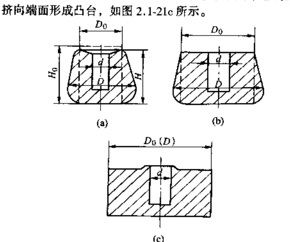


图 2.1-21 冲孔时坯料形状的变化

② 孔冲偏。引起孔冲偏的原因很多，如冲子放偏，冲头的形状尺寸不规正，毛坯温度不均匀等。此外，毛坯愈高愈易冲偏，因而一般毛坯高度 H_0 要小于坯料直径 D_0，即 $H_0\leqslant D_0$。由图 2.1-22 可以看出，随着冲孔深度的增加，坯料高度将逐渐减小，但超过某值后，坯料高度反又增加，这是因为冲深后坯料底部翘起的缘故。从此图还可以看出，D_0/d 越小，拉缩现象越严重，所以，坯料高度 H_0 与锻件高度 H 的关系如下：

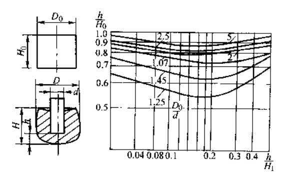


图 2.1-22 冲孔深度与坯料高度的关系

当 $D_0/d\geqslant5$ 时，取 $H_0=H$。

当 $D_0/d<5$ 时，取 $H_0=(1.1\sim1.2)\ H$

3）冲孔时的注意事项

① 冲孔前坯料必须加热均匀。

② 冲孔前坯料应该镦粗，使高度减小，端面平整。

③ 冲孔时冲头应该放正。

④ 冲孔过程中坯料绕轴线不断转动，调节打击位置，防止孔形偏斜。

（4）扩孔

使空心坯料内外径都增大而壁厚减薄的锻造工序称为扩孔。常用的扩孔方法有冲子扩孔和芯棒扩孔等。

1）冲子扩孔 该方法是用直径较大的锥形冲子或球而冲子从坯料内孔中穿过使其内外径扩大，如图 2.1-23 所示，适于在锤上扩孔时，对 $D/d>1.7$ 和 $H\geqslant0.125D$ 的带孔饼块类锻件。该法扩孔时，坯料高度会拉缩，因而应考虑修正系数。通常扩孔前坯料高度 H_0 为

$$H_0=1.05H$$

式中，H 为锻件高度；1.05 为修正系数。

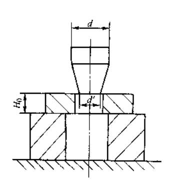


图 2.1-23 冲子扩孔

冲子扩孔时，坯料受切向拉应力，容易胀裂，因而每次扩孔量不宜过大。扩孔量大小可参照表 2.1-1 选取。

冲孔后可扩孔 1～2 次。重量大的锻件需要多次扩孔时，应再加热，每加热一火，允许再扩孔 2～3 次。



表 2.1-1 冲子扩孔的扩胀量

坯料扩孔前的孔径/mm	允许扩孔量/mm
30 ~ 115	25
120 ~ 270	30

2) 芯棒扩孔　芯棒扩孔又称马杠扩孔，如图 2.1-24 所示。坯料局部受力局部变形，因而不易产生裂纹破坏。坯料在扩孔时，主要沿圆周方向伸长，高度略有增加，因此扩孔前坯料高度可按下式确定：

$$H_0 = 1.05KH$$

式中，H_0 为扩孔前坯料高度；H 为锻件高度；K 为增宽系数，可按图 2.1-25 选定；1.05 为修正系数。

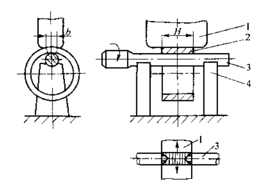


图 2.1-24　芯棒扩孔

1—扩孔砧子；2—锻件；3—芯棒（马杠）；4—支架（马架）

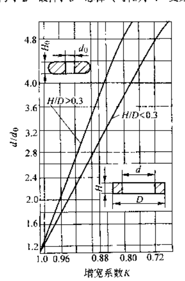


图 2.1-25　芯棒扩孔增宽系数

芯棒扩孔所用的芯棒直径 $d_{芯}$，应保证芯棒强度和锻件质量。如芯棒过细，不仅锻压时容易折断，还会在锻件内壁留下梅花状压痕。为了获得内壁光滑的锻件，芯棒直径应随孔径扩大而增大，但一般在扩孔过程中最多可更换三次芯棒。

在锤上扩孔时，芯棒直径 $d_{芯}$ 可参考表 2.1-2 选取。在水压机上扩孔时，可按锻造水压机压力（p）和锻件高度（H）查图 2.1-26 确定。

在锤上扩孔时，若冲孔直径大于芯棒直径，可以直接套在芯棒上扩孔，否则，得先胀孔再扩孔。在水压机上扩孔时，冲孔坯料与锻件之间的尺寸关系如下：

表 2.1-2　锤上扩孔最小芯棒直径

锻锤吨位/N	最小芯棒直径 $d_{芯}$/mm
750	60
1 000	80
2 000	110
3 000	120
5 000	160

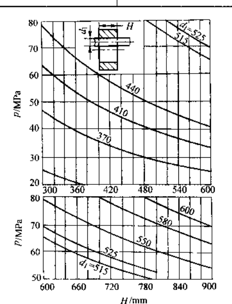


图 2.1-26　选择芯棒直径线图

$$(D_0 - d_0)/H_0 \leqslant 5$$

$$d_0 = d_1 + (30 \sim 50)$$

$$H_0 = H - \mu(d - d_0)$$

式中，D_0、d_0、H_0 为冲孔坯料外径、内径、高度；d_1 为芯棒直径；d、H 为锻件的内径和高度；μ 为摩擦因数（新砧取 0.6，窄砧取 0.3 ~ 0.2）。

由于芯棒扩孔时变形区小，不易产生裂纹且成形力小，所以适宜扩制薄壁环形件。但是芯棒扩孔切向应变并不均匀。

(5) 芯棒拔长

使空心坯料外径减小、内径不变（壁厚减薄）、长度增加的锻造工序称为芯棒拔长，如图 2.1-27 所示。这种方法可用于锻制圆筒类锻件。

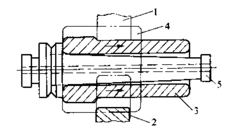


图 2.1-27　芯棒拔长

1—上平砧；2—下型砧；3—锻件；4—坯料；5—芯棒

芯棒拔长系空心坯料拔长，与实心坯料拔长类似，同样也存在效率和质量问题。为了提高芯棒拔长的效率，必须增



强轴向流动，减少坯料的径向流动。为此采取如下措施。

1）提高坯料加热温度，预热芯棒到150～250℃，保持坯料在高温下成形。

2）将芯棒加工成1/100～1/150的斜度，并要求表面光滑。在拔长时可涂润滑剂，以提高坯料轴向流动能力。

3）用型砧拔长，限制横向变形，增加轴向流动量。对薄壁件用上下型砧或圆弧砧拔长。对厚壁件，可用上平下V或平砧拔长。但在平砧上拔长时应先锻成六角形，再锻成圆形。

芯棒拔长的主要质量问题是锻件壁厚不均匀，两端容易开裂。为此要求坯料加热温度应均匀，转动和压下要均匀。为防止坯料两端裂纹，应先锻两端再锻中间，并按图中箭头顺序依次锻压，这样不仅保证两端坯料在高温时成形，而且坯料容易从芯棒上取下。

（6）弯曲

将毛坯轴线弯成规定形状的工序称为弯曲。该工序可用于锻造各种弯曲类锻件，如起重机吊钩、曲轴等。

坯料弯曲变形时，内侧金属受压可能产生折叠，外侧金属受拉容易产生裂纹。坯料弯曲后断面形状要发生畸变（如图2.1-28所示），面积有所减小，长度略有增加。弯曲角度越大，弯曲半径越小，上述现象越严重。

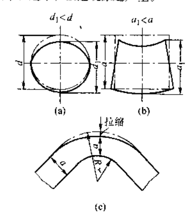


图2.1-28　坯料在弯曲时的变形

弯曲时应注意：

1）坯料弯曲段应加热均匀。最好只加热被弯曲段，不弯曲部分可以不加热。

2）考虑到弯曲处断面减缩，坯料断面应比工件断面积稍大（约增大10%～15%），即在弯曲段外侧附加防止拉缩的金属，保证弯后断面形状规正。

3）如锻件有多处弯曲时，弯曲的次序是先弯端部及弯曲段与直线段交界部位，然后再弯其余的圆弧部分。如图2.1-29所示。

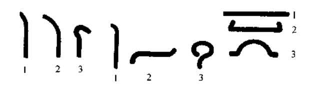


图2.1-29　带弯锻件的操作顺序

（7）扭转

将坯料的一部分相对另一部分绕其共同轴线旋转一定角度的工序称为扭转。图2.1-30表示了用扭转法锻造曲轴的情况。用热扭转还可以制造麻花钻、地脚螺栓等锻件。

坯料扭转时，变形区的长度略有缩短，直径略有增大。但是中心变化小而外层缩短多，因此当扭转角α过大、温度低、金属塑性差时，在扭转表面上均可能生成裂纹。

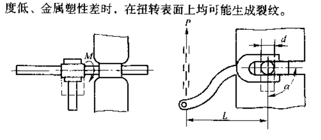


图2.1-30　扭转曲轴示意图

扭转时应注意的事项：

1）受扭转的部分在扭前应仔细锻造，形状要规正，尺寸要一致，表面缺陷应该清除。必要时要经粗加工后再扭转。

2）受扭部分应加热至金属允许最高温度，并且要均匀热透，保持良好的塑性。

3）锻件扭转后要求缓冷消除内应力。最好进行退火处理。

（8）错移

将坯料一部分相对另一部分平行位移的工序称为错移。该方法可用于锻制曲轴等锻件。错移的方法有两种，如图2.1-31所示。

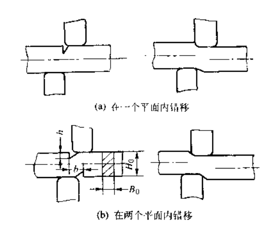


图2.1-31　错移

错移前坯料压肩的尺寸可按下式计算：

$$h=\frac{H_0-1.5d}{2}$$

$$b=\frac{0.9V}{H_0B_0}$$

式中，H_0、B_0为坯料的高度、宽度；d、V为锻件轴颈直径、轴颈体积。

1.2　自由锻工艺过程的制订

制订锻造工艺过程应遵循以下原则：

1）所订工艺应满足产品技术要求，符合塑性成形技术的发展方向，具有先进性。同时应考虑现实生产条件，具有适用性。

2）要保证质量，提高效率，减轻劳动强度，节材、节能，环保，安全，具有良好的社会经济效益。

3）自由锻工艺过程的主要内容：

① 依据零件图和技术要求绘制锻件图。

② 计算用料重量，确定坯料尺寸。

③ 制定变形工艺，选用锻压工具。

④ 确定力能参数，选择锻压设备。



⑤ 确定加热、锻造、冷却规范。

⑥ 制定锻后热处理规范。

⑦ 提出锻件技术条件与检验要求。

⑧ 确定工时定额，填写工艺卡片。

本章主要介绍①②③，其余内容可参考有关章节。

(1) 绘制锻件图

锻件图是编制锻造工艺、设计工具、指导生产和检验锻件的主要依据。它是依据零件图加上机械加工余量、锻造公差（对锻后不需机加工的黑皮锻件只考虑锻造公差）、锻造余块、检验试件及工艺卡头等按行业习惯绘制而成。

锤上锻制碳钢或低合金钢锻件的余量和公差见相关手册成资料，其他材质锻件的余量与公差由供需双方协商确定。如用钢锭锻造，则余量公差应加 15%。

自由锻件的锻造精度分为两个等级。F 级用于一般精度，E 级要求较高，一般用于大批量生产。

画锻件图应注意的事项：

1) 锻件图的形状应有真实感，可以不严格按比例绘制，但必须能清楚表达相关尺寸。

2) 锻件外形用粗实线画，相应部分零件形状用细实线或双点划线画，这样可以方便地看出机械加工余量的分布情况。

3) 锻件公称尺寸和公差应标在尺寸线上方，零件尺寸标在相应下方的括号内。锻件上的测量尺寸（如总长、最大直径、法兰、凹挡、偏心距、弯曲角等）应标出。各部分长度应选择基准面标注。

4) 应标明特殊余块，如试棒、热处理夹头、机加工夹头等。

5) 锻造技术条件和某些规定无法在锻件图上标出时，可用技术条件来说明。

(2) 确定坯料的重量和尺寸

锻造用原材料有两种：一是钢材、钢坯，多用于中小型锻件。另一种是钢锭，主要用于大型锻件。

1) 坯料重量的计算　坯料重量 $G_{坯}$ 为锻件重量与锻造时各种金属损耗重量之和。可按下式计算：

$$G_{坯} = G_{锻} + G_{损}$$

式中，$G_{锻}$ 为锻件重量；$G_{损}$ 为各种损耗的重量。它包括：加热烧损重量 $G_{烧}$、冲孔芯料损失 $G_{芯}$、切头损失 $G_{切}$。若用钢锭锻造时，还应考虑切除冒口和锭底部分的重量（$G_{冒}$、$G_{底}$）。

锻件重量 $G_{锻}$ 等于锻件体积乘以金属的密度。锻件体积按锻件公称尺寸或公称尺寸加上正公差的一半计算。若锻件形状复杂，可简化为几个单元体分别计算然后相加。对于大型锻件还应考虑台阶处余面（附加料）的重量，如图 2.1-32 所示。

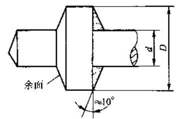


图 2.1-32　锻件台阶余面

钢料烧损重量 $G_{烧}$，一般以被加热金属的百分比（烧损率）表示。其数值与所用加热设备类型、加热温度与时间、坯料形状尺寸有关，可由表 2.1-3 选取。

表 2.1-3　钢料加热烧损率

加热方式	烧损率/%
室状燃煤炉	1.5～3
燃油加热炉	1.5～2
煤气加热炉	1.5～2.5
电阻加热炉	1～1.5
感应电加热	0.5～1.0

注：1. 重复加热烧损率减半。
2. 空心件加热烧损率取上限。

冲孔芯料损失 $G_{芯}$ 取决于冲孔方式、冲孔直径。在数值上可按以下公式计算。

实心冲孔　$G_{芯} \approx (1.18 \sim 1.57)\ d^2H$

空心冲孔　$G_{芯} \approx 6.16d^2H$

垫环冲孔　$G_{芯} \approx (4.32 \sim 4.71)\ d^2H$

式中，$G_{芯}$ 为冲孔芯料重量，kg；d 为冲孔直径，dm；H 为冲孔前坯料的高度，dm。

端部切头损失 $G_{切}$：在锻造轴杆类锻件时，端部多余金属应切去，以保持锻件端头平齐。$G_{切}$ 可按下式计算：

锻件端部为圆形者　$G_{切} = (1.65 \sim 1.8)\ D^3$

锻件端头为矩形者　$G_{切} = (2.2 \sim 2.36)\ B^2H$

式中，$G_{切}$ 为切头重量，kg；D 为锻件端头直径，dm；B、H 为锻件端部的宽度与高度，dm；系数在水压机上锻造取下限，在锤上锻造取上限。

另外，可根据锻件端部尺寸查图 2.1-33 求知。实际上，如果锻件比较复杂或者端部要求比较高，则切头重量还要适当增大。

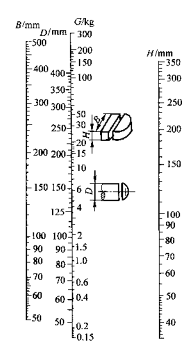


图 2.1-33　端部切头计算图

在采用钢锭锻造时，应该切去钢锭上下端有缺陷的部分。切除冒口与底部重量与钢锭重量百分比如下：

碳钢锻件　冒口切除率　18%～25%；

　　　　　底部切除率　5%～7%。

合金钢锻件　冒口切除率　25%～30%；

　　　　　锭底切除率　7%～10%。

2）坯料尺寸的确定　下料尺寸与后续的锻造工序有关

① 镦粗坯料时，坯料高径比（H_0/D_0）一般不大于 2.5，否则将产生弯曲。也不要小于 1.25，否则下料困难。

由于坯料重量已算出，可以算出坯料体积 $V_坯$

$$V_坯 = G_坯/\rho$$

式中，ρ 为钢的密度。

考虑上述坯料高径比的规定，则其直径为：

对圆坯料　$D_0 = (0.8\sim1.0)\sqrt[3]{V_坯}$

对方坯料　$A_0 = (0.75\sim0.90)\sqrt[3]{V_坯}$

当计算出坯料的直径 D_0（或边长 A_0）之后，应按有关标准确定选用尺寸。

在选定坯料的直径（或边长）后，就可确定坯料的下料长度，即：

$$H_0 = V_坯/F_坯$$

式中，$F_坯$、H_0 为坯料的截面积和下料长度。

下料长度还应考虑锻压设备工作空间高度和加热炉底有效尺寸。

② 拔长锻造时，应按锻件最大截面积（$F_锻$），并考虑锻造比（K_L）的要求后确定坯料尺寸。

$$F_坯 = K_L F_锻$$

以圆坯料为例，坯料直径（D_0）为

$$D_0 = 1.13\sqrt{F_坯}$$

然后，根据标准选出坯料直径（或边长），一般选取标准尺寸或相邻较大的标准尺寸。

$$H_0 = V_坯/F_坯$$

③ 钢锭规格的选择。确定钢锭重量的方法有两种。

方法一：先确定锻压过程中的各种损耗，如 $\delta_{冒口}$（%）、$\delta_{底部}$（%）、$\delta_{烧损}$（%）、$\delta_{损耗}$（%）等，再算出钢锭利用率 η

$$\eta = [100 - (\delta_{冒口} + \delta_{底部} + \delta_{烧损})]\ \%$$

然后求出钢锭的计算重量 $G_锭$

$$G_锭 = \frac{G_锻 + G_{损耗}}{\eta}$$

式中，$G_锻$ 为锻件重量；$G_{损耗}$ 为除冒口、锭底、烧损以外的损耗重量。

方法二：先根据经验或统计资料概略确定钢锭利用率，而后求得钢锭计算重量

$$G_锭 = G_锻/\eta$$

再从有关钢锭规格表中选择所需规格的钢锭。

(3) 制定变形工艺，选用锻造工具

制定变形工艺，包括确定锻件成形所需要的基本工序、辅助工序、修理工序及其排列顺序和工序尺寸。设计选用锻造工具包括设计专用工模具，选用合适的通用工具、辅具等。

制定变形工艺是编制锻造工艺规程中的关键环节，也是难度较大的内容，因为它涉及诸多影响因素。例如，锻件技术条件、坯料质量及供应状况、生产批量及交货期、工人的经验与习惯、操作技术水平、生产管理水平、车间设备条件、工具、辅具情况等。本着先进适用的原则尽量做到优质、高效、低成本、易实施。

各类锻件的变形工序安排，可根据锻件的形状尺寸和技术要求，结合各锻造工序的变形特点，参考类似典型工艺具体确定。

轴杆类锻件主要采用拔长工序。如果横向力学性能要求较高，或带有较大的台阶、法兰时，则需采用镦粗——拔长的变形工艺。

饼块类锻件，一般均以镦粗成形为主，但带凸肩者可采用垫环镦粗或局部镦粗。如果有孔，还需进行冲孔。

空心锻件一般均需镦粗、冲孔。对于圆环要增加芯棒扩孔工序，对圆筒则要加芯棒拔长工序。空心锻件的变形方案可按锻件的主要尺寸，外径（D）、内径（d）和高度（H）的关系查找图 2.1-34 和图 2.1-35 确定。应当指出，上述选择空心锻件的线图，是在某种生产条件下的经验总结，因而具有局限性，使用时还应加以分析。对批量较大、尺寸较小的空心件，可采用胎模锻造；环形件可在冲孔后用扩孔机扩孔。

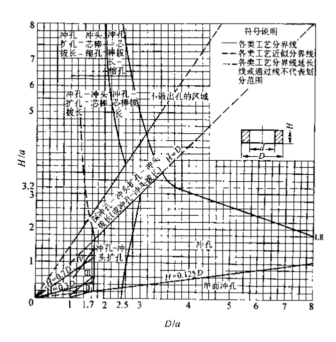


图 2.1-34　锤锻空心锻件工艺方案的选择

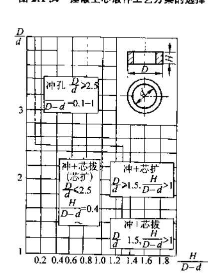


图 2.1-35　水压机锻空心锻件工艺方案的选择

工序尺寸设计和工序选择是同时进行的，在确定工序尺寸时应注意下列各点：

1）工序尺寸必须符合变形规则，例如，镦粗时毛坯高度与直径之比应小于 2.5～3。拔长时截面积变换经验计算公

式见表 2.1-4。

表 2.1-4　坯料拔长截面积变换经验算法

截面变换内容	变形简图	计算公式
由圆变方		当 $l=b$ 时： $D=(1.35\sim1.45)A$ l—送进量；b—砧宽
由方变圆		$A=(0.98\sim1.0)D$
由圆变扁方		1. 当 $H<0.5B$ 时： $D=\frac{2B+H}{3}$ 2. 当 $H\geqslant0.5B$ 时： $D=\sqrt{H^2+B^2}$
由方变扁方		$A\geqslant1.5H\left(\sqrt{1+1.8\frac{B}{H}}-1\right)$
由八角变圆		$D=1.03C$
由扁方变方		当 $\frac{砧宽\ b}{锻件宽\ H}\geqslant1\sim1.4$ 时： $B=(1.4\sim1.65)A$ $H=(0.75\sim0.8)A$

2）必须预计各工序变形后坯料尺寸的变化。例如，冲孔后坯料高度可能会减少，扩孔后坯料高度有所增加等。

3）在坯料上分段压痕、压肩时，应保证相应部分锻件体积足够。

4）多火次锻制大锻件时，应注意中间再次加热的可能性。

5）为了弥补毛坯在冲孔、错移、压肩等工序中的拉缩现象，必须在中间工序留有一定的修整量。

6）对长轴类锻件及长度方向尺寸要求很准确，又不允许镦粗者（如曲轴、凹挡等），设计工序尺寸时，应考虑坯料经过修整时，长度可能伸长的数值。

（4）锻造比的选择及算法

锻造比（K）是传统的锻造变形参数。它能方便地反映出锻造宏观变形程度，概略地表述锻压效果，因此，生产中常把锻造比作为一个规定的工艺参数。但是，锻造比不能给出锻造过程的信息和锻件内应力、应变、温度分布的场量信息，因而不能正确地说明锻造微观组织结构、力学性能的演变，只能从制件宏观几何尺寸的变化，定性地反映锻压效果。一般锻造比大，变形程度大，有利于消除铸态结构，形成锻造组织。由于锻造比简单方便，因而现在锻压生产中仍沿用这个工艺指标。

1）锻造比的计算方法如表 2.1-5 所示。

表 2.1-5　锻造比的计算方法

序号	锻造工序	变形简图	工序锻比
1	钢锭拔长		$K_L=\frac{D_1^2}{D_2^2}$
2	坯料拔长		$K_L=\frac{D_1^2}{D_2^2}=\frac{l_2}{l_1}$
3	拔长-镦粗-拔长 或 镦粗-拔长-镦粗		$K_L=K_{L1}+K_{L2}=\frac{D_1^2}{D_2^2}+\frac{D_3^2}{D_4^2}=\frac{l_2}{l_1}+\frac{l_4}{l_3}$ 或 $K_H=K_{H1}+K_{H2}=\frac{l_0}{l_1}+\frac{l_2}{l_3}$
4	芯轴拔长		$K_L=\frac{D_0^2-d_0^2}{D_1^2-d_1^2}=\frac{l_1}{l_0}$



续表 2.1-5

序号	锻造工序	变形简图	工序锻比
5	马杠扩孔		$K_1=\frac{D_0-d_0}{D_1-d_1}=\frac{l_0}{l_1}$
6	镦粗		轮毂 $K_H=\frac{H_0}{H_1}$ 轮缘 $K_H=\frac{H_0}{H_2}$

注：1. 钢锭开坯倒棱锻比不计入总锻比。

2. 连续拔长或连续镦粗，总锻比等于工序锻比的乘积 $K=K_{L1}K_{L2}K_{L3}\cdots$；$K=K_{H1}K_{H2}K_{H3}\cdots$。

3. 两次拔长之间有镦粗，或两次镦粗之间有拔长，总锻比等于两次拔长（或镦粗）工序锻比之和，$K=K_{L1}+K_{L2}$或 $K=K_{H1}+K_{H2}$，并且要求工序锻比 K_{L1}，K_{L2}，K_{H1}，$K_{H2}\geqslant 2$。

2）锻造比的选择。用钢材锻制锻件时（莱氏体钢除外），一般可不考虑锻造比。用钢锭锻造锻件时，必需考虑锻造比。碳素结构钢锻件锻造比可取 2～3，合金结构钢取 3～4。对莱氏体钢锻件，为了充分破碎铸态组织，均匀碳化物的分布，应选择大的锻造比。对重要的铸件还有规定的锻造比。

表 2.1-6 列出了一些典型锻件的锻造比。

表 2.1-6 典型锻件的锻造比

锻件名称	计算部位	总锻比 K
碳素钢轴 合金钢轴	最大截面	2.0～2.5 2.5～3.0
冷轧混 冷轧辊①	辊身	2.5～3.0 3.5～5.0
船用轴	法兰 轴身	>1.5 ≥3.0
水轮机空心轴	法兰 轴身	>1.5 ≥2.5
曲轴	曲拐 轴颈	≥2.0 ≥3.0
模块	最大截面	≥3.0
汽轮机转子① 发电机转子①	轴身	3.5～6.0
汽轮机叶轮① 涡轮盘	轮毂 轮缘	4.0～6.0 6.0～8.0
航空用大锻件①	最大截面	6.0～8.0

① 总锻比 $K\geqslant 5$ 时，其中通常包含有未计入总锻比的 K_H 或 K_L。

2 锻造原材料及其加热

2.1 钢锭与钢材

（1）钢锭

模铸钢锭经过初轧或锻压可以制成钢材或钢坯。近年来随着连铸连轧技术的发展，改变了以往模铸钢锭生产钢材的方法。所以，钢锭主要作为锻造大锻件的原材料。

钢锭的质量主要取决于冶炼、铸锭过程。所谓优质钢锭主要指钢质纯净度好，结晶结构合理，表面和内部缺陷少。

1）锻造用钢锭的类型和规格　锻造钢锭的类型主要取决于锭身高径比（H_0/D_0）或高宽比，锥度 $\left(\frac{D_上-D_下}{H}\times100\%\right)$，横截面形状及棱角数。钢锭规格主要指公称重量、锭型参数，尚须考虑浇注方式及形状尺寸特征。

① 普通锻造钢锭。高径比为 2～3，锥度为 4%～7%，横截面为波浪状八角形。可上注亦可下注（当前提倡下注）。

② 短粗型钢锭。高径比 1.0～1.5，锥度 8%～12%，横截面为多角形，棱角数常见有 12、16、24，冒口较大。

短粗型锭有利于夹杂物上浮和气体逸出，减少偏析，改善内部质量。常用于锻造合金钢重要大锻件。

③ 细长型钢锭。高径比达到 4，锥度为 5%。一般用于锻制轴杆类锻件，可减少锻造工时，提高钢锭利用率。

④ 空心钢锭。空心钢锭用于锻制环、筒类空心锻件。可简化工序，提高材料利用率，而且偏析、疏松少，结晶结构较合理。

⑤ 短冒口钢锭。用于锻造中、低碳钢和低合金结构钢的大型空心件，该钢锭采用普通锭模，减少冒口钢水量浇成。

曾经应用过三瓣型钢锭、定向凝固锭、电渣重熔锭等。随着冶炼、铸造技术的进步，将来还会出现新的异型锭和铸-锻联合的制品，从而进一步提高大型锻造的技术经济效益。

2）钢锭的冶金缺陷及改善措施　钢锭的缺陷对锻造工艺过程和锻件的质量均有不良的影响，所以，采用相应的措施消除、预防缺陷，对提高锻造生产的技术经济效益有重要的意义。

钢锭缺陷的特征、类别、成因及对策如表 2.1-7 所示。

钢锭冶金质量主要取决于炼钢、铸锭的生产技术和管理水平。目前在大型铸锻件行业主要采取如下政策措施来提高钢锭冶金质量。

① 对炼钢炉料、辅料、耐火材料应严格按照技术标准和管理制度订货、验收、保管和配料。要特别注意耐火材料的品质，防止在炼钢和浇注时，钢液被耐火材料污染。

② 要广泛采用钢水炉外精炼技术，用好钢包精炼炉及各种真空处理装置。

③ 淘汰平炉炼钢，发展大型高功率、超高功率电炉及直流电弧炉炼钢。推广吹氧炼钢，重点发展电炉吹氧返回法冶炼合金钢。用好电渣重熔设备，满足特殊钢锻件的需要。



表 2.1-7　钢锭缺陷的成因及预防措施

缺陷名称	主要特征	产生原因及对锻件的影响	减少与消除的措施
缩孔	钢锭凝固后，在上端形成的孔洞及缩管	钢锭冷凝收缩时补缩不良造成。锻造时切除不净则形成裂缝与折迭	采用发热冒口、绝热冒口，改善钢液补缩条件，使缩孔上移至冒口处，锻造时切除
疏松	钢锭中上部的海绵状组织结构。包含中心疏松与一般疏松	钢锭凝固时，晶间冷缩形成的显微空隙与针孔，此处夹杂聚集力学性能较差	提高加热温度，改善锻压时的应力、应变状态，使其锻合、压实
枝晶偏析（微观偏析）	树枝状晶与晶间的物理、化学及杂质分布的不均一性	选择结晶，以及溶解度的变化	以高温扩散、锻压变形、热处理均匀化来消除
区域偏析（宏观偏析）	钢锭内各处化学成分及杂质分布的不均一性。如锭心 V 形正偏析；离心处 A 形正偏析；底部的锥形负偏析区	由钢锭结晶过程中的选择结晶，溶解度变化，比重差异造成。区域偏析会形成锻造裂纹及力学性能不均匀等缺陷	1）降低钢中硫、磷等偏析元素的含量 2）采用多炉合浇，冒口补浇工艺 3）采用振动浇注
硫化物夹杂	内生非金属夹杂物 1）熔点 FeS 1 170 ~ 1 197℃ MnS 1 620℃ 2）分布在枝晶间及区域偏析处 3）塑性好，易变形	1）偏析严重，硫含量高 2）片状或密集分布危害大 3）形成应力集中开裂 4）形成热脆 5）降低力学性能	1）炼钢时充分脱硫 2）减少偏析 3）充分锻压变形，改善夹杂物的形状与分布
氧化物夹杂	细小的内生夹杂 1）熔点 FeO　1 420℃ MnO　1 780℃ Al_2O_3　2 030℃ 2）沿晶界分布 3）呈脆性，不易变形	1）脱氧产物未排出 2）二次氧化产物 3）降低锻件塑性、韧性，引起疲劳破坏	1）清洁炼钢炉料，充分沸腾脱氧 2）炉外精炼、脱氧去夹杂 3）使夹杂在浇注时上浮 4）锻压变形，改善分布
硅酸盐夹杂	内生非金属夹杂 1）熔点 $2MnSiO_2$　1 300 ~ 1 340℃ $2FeOSiO_2$　1 180 ~ 1 380℃ （FeMn）SiO_4 1 380 ~ 1 700℃ 2）多分布于钢锭底部及表层 3）具有一定的塑性	1）炼钢炉料不清洁、不纯净 2）冶炼时夹杂物未充分排出 3）降低钢的力学性能，引起应力集中裂纹	1）提高钢液纯净度 2）防止耐火材料污染 3）清洁浇注
表面裂纹	在钢锭表面上出现的纵向裂纹或横向裂纹	1）纵裂：锭模设计不合理，注温高，注速快，钢锭表面冷凝层被钢液压裂 2）横裂：锭模表面不干，或保温帽与锭模间缝隙产生悬挂阻碍钢锭自由收缩，冷凝层被拉裂	1）改善锭模设计 2）加强锭模维修检查 3）控制注温，注速 4）严格工艺规范 5）锻前用烧剥枪清除表面裂纹
中心裂纹	钢锭心部的纵裂或横裂	1）偏析或中心疏松严重 2）钢中气体含量高 3）温度应力，残余应力大	1）提高冶炼，铸锭质量 2）热锻焊合压实
结疤	钢锭表面斑疤	1）上注时钢液溅珠 2）上注时氧化膜翻皮 3）钢膜损坏 4）锻件呈分层氧化表面不平现象	1）上注时采用防溅圈 2）控制注速，注温 3）火焰清理钢锭表面
钢中气体	1）有害气体的种类：氢、氧、氮 2）存在状态：化合物、原子态、分子态 3）分布位置：固溶于钢中或存在于气泡中。一般锭心比表层多，上部比下部多	1）由炉料、炉气、空气进入钢中 2）钢液未充分沸腾排气 3）钢中气体会加剧偏析，降低塑性、韧性。氢含量超过 2×10^{-6}时，锻件冷却时可能产生白点废品	1）烘烤炉料，充分沸腾，炉外精炼脱气 2）真空处理，清洁浇注 3）热处理扩散 4）充分锻压变形 5）降低氢含量和组织应力，防止锻件中白点缺陷



续表 2.1-7

缺陷名称	主要特征	产生原因及对锻件的影响	减少与消除的措施
皮下气泡及内部气泡	钢锭表层下及内部的气泡及空穴	钢中 CO 及其他气体未排出 钢中气泡会引起锻造裂纹	1）充分排气 2）高温锻合 3）及时吹剥表面裂纹
外来夹杂	炼钢、注锭时由外界混入的非金属杂质或异金属材料	1）被钢液冲刷腐蚀的耐火材料及钢渣混入钢液 2）异金属落入钢液	1）提高耐火材料的品质 2）严格执行清洁浇注
重接	钢锭本体上出现的氧化断层	浇注时钢液流中断，钢液表面被氧化	注意浇注连续性，防止钢液断流

④ 重视钢液真空处理。大力推广下注法并采用保护浇注，积极推广发热冒口、保温冒口技术。改进钢锭模材料、结构和技术参数。

(2) 锻造用钢材

中小型自由锻件常用圆形或者方形断面一定长度的轧材或者锻坯生产，如图 2.1-36 所示。

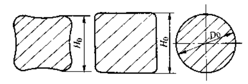


图 2.1-36　常用钢材截面类型

钢材按化学成分不同分为碳钢和合金钢两类；按质量不同分为普通钢、优质量、高级优质钢三类；按用途不同分为结构钢、工具钢、特殊钢三类。此外按金相组织、冶炼方法还有不同的分类。有关钢材的类别和规格请参考相关手册。

2.2　算料与下料

(1) 算料

算料的基本公式：

$$G = \rho V$$

式中，G 为坯料的重量；ρ 为材料的密度；V 为坯料的体积。

(2) 下料

将钢材切断为所需长度的坯料，称为下料。下料的方式有剪切、折断、锯切、车削分段、火焰切割、砂轮摩擦切断及精确下料等。常用的有剪切下料、冷折下料、锯切下料等。随着精密模锻技术的发展，精确下料越来越受到关注。大锻件所用坯料的下料，多在锻压设备上热剁或使用火焰切割。

1）剪断机下料　剪切下料是一种普遍采用的方法，其特点是生产率高，无切口损耗，但剪切断面质量与尺寸精度较差。

① 棒料剪切机规格。目前我国棒料剪切机规格有 QA42、Q42、KS 系列。

② 剪切力。剪切力 P 可按下式计算

$$P = KF\tau$$

式中，F 为剪切断面积，mm²；τ 为材料抗剪强度，MPa；K 为考虑刃口锐钝和刀片间隙变化的系数，通常 $K = 1.0 \sim 1.2$。

一般钢的抗剪强度 τ 与同温度下的强度极限 σ_b 有如下关系：

$$\tau = (0.7 \sim 0.8)\ \sigma_b$$

③ 剪切断面质量与剪切精度。坯料剪切时，在刀片作用力的影响下，经过压入、开裂、拉断三个阶段而剪开。因此，坯料常有局部被压扁、断面不平整，以及剪断面带毛刺、裂纹等缺陷。长度尺寸也会产生一定的误差。有关剪切质量与剪切精度均有相应的规范与要求，可查相关手册。

④ 预热剪切。预热剪切能减少裂纹、降低剪切力。表 2.1-8 列出了几种钢材直径与预热温度的关系。碳钢预热至 250～350℃时，可以得到整齐的断面，即所谓兰脆下料。

表 2.1-8　棒料预热温度

（炉温应保持在 600℃左右）　/℃

钢号	棒料直径/mm			
	50～68	70～90	90～110	110～150
碳素钢 40、45 以内	—	150～250	200～250	250～300
40Cr、45Cr	200～300	250～350	300～400	300～400
18CrMnTi、20CrMnTi	250～300	250～350	350～450	450～500
12CrNi3A、20CrNi3A	250～300	300～400	400～500	500～600

根据棒料剪断后断面颜色可判断预热温度的数值，见表 2.1-9。

表 2.1-9　剪断面颜色和预热温度

端面颜色	浅蓝色	灰色	深蓝色	红色	白色
温度/℃	250～300	300～350	350～400	450～550	室温或 100℃以下

棒料预热可用火焰炉、电加热、远红外加热等。应用最多的是传送带式机械化煤气炉，该预热炉的基本参数列于表 2.1-10。

表 2.1-10　剪切棒料预热炉的基本系数

棒料剪断机能力 /MN	炉子生产能力 /t·h⁻¹	炉底面积 /m²	炉子轮廓尺寸/mm 长	宽	高	金属加热温度 /℃	煤气 耗量 /m³·h⁻¹	煤气 热值 /kJ·m⁻³	炉子重量 /t
5	4.5	6.496×1.431=9.3	11 050/7 578	6 100	2 100	500	800	7 535	47.067
10	6	6.496×1.624=10.5	11 100/7 600	6 300	2 100	500	1 200	5 230	48.00
16	11	6.496×1.798=11.7	10 620/7 800	6 400	2 200	500	1 500	5 230	42.497

2）锯切下料　锯切下料与剪切相比，生产率低，锯口损耗比较大，但其下料长度精确，锯切断面平整，特别适宜于精密锻造，小批量锻造生产。同时也用于管材和非铁金属的下料。

锯床分圆盘锯床、带锯床、条锯床（往复锯切）、砂轮锯等。

① 圆盘锯切。圆锯床的锯片按结构分为整体锯片和镶块锯片两种，按齿数分为粗齿、中齿、细齿三种。

镶齿锯片本体为合金结构钢或65Mn钢，镶齿为高速钢。粗齿镶片锯适用于切割大截面坯料。细齿和中齿适宜于锯切高硬度的各种截面的坯料，如棒料、管子、成捆的钢材等。

② 往复锯切。往复锯切使用锯条和锯弓往复锯切坯料，其平均生产率仅相当圆锯的1/3～1/5，且锯料直径越大，差别越大。故多用于锯切中小截面坯料，也可锯切管料、料头及机修工具的下料等。合金工具钢锯条厚度有1.8 mm、2.25 mm、2.3 mm等，碳素工具钢锯条厚度更大些，切口损耗约为3～4 mm，切削速度约为16～49 m/min。

③ 带锯切割。带锯切生产率为普通圆锯切的1.5～2倍，带锯切的单位动能消耗只是圆锯的1/4。锯带的厚度一般为0.9～1.06 mm，切口损耗为圆锯的1/4～1/5。

带锯适宜于大批量生产。不仅可锯切碳素钢，而且可以锯切不锈钢、钛合金等材料。目前，我国生产的带锯厚度有0.9 mm，宽度为12.5 mm、19 mm和25 mm三种。厚度1.06 mm的，其宽度为31.5 mm。

使用双金属锯带促进了重载荷锯床的大批生产。双金属锯带的刃口为含钼或含钴的高速钢，硬度为68～69HRC，背部为弹簧钢，硬度为48～50HRC。

目前，围绕提高锯切的生产率，减少切口损耗等环节，锯切技术不断改进与提高。例如，双金属圆锯片厚度减小为2.5 mm，高速圆锯床的生产率为带锯、普通圆锯床的2～3倍。

④ 砂轮切削。砂轮切削能得到高质量的切口，生产率也较高。但是，砂轮片寿命低，工作时噪声、粉尘大。仅用于难切割的金属材料，如耐热钢、高温合金（GH4033，GH4037）等。

3）冷折下料　带有预制缺口的坯料，在压力机上进行三点压弯，坯料因应力集中而脆性断裂。如图2.1-37所示。L为下料长度，C为支座宽度，h为缺口深度，b为缺口宽度，r为预制缺口底部圆角半径。预制缺口深度可按下式确定：

$$h = KH^{1/3}$$

式中，H为方坯的边长，mm；K为钢材塑性系数，较脆的钢$K=1$，较韧的钢$1<K<2$。

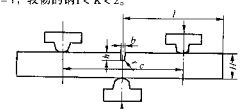


图2.1-37　冷折示意图

冷折时，缺口底部产生的最大拉应力σ_{max}为

$$\sigma_{max} = 2\sigma\sqrt{h/r}$$

式中，σ为无应力集中条件下的应力值。

由上式可知：h愈大，r愈小，越易断裂。

缺口宽度b可在3～5 mm间选定。按开缺口方法为氧割、锯割、车切、电火花切割。

冷折力可按下式计算

对圆坯料　$P = 0.4KD^3\sigma_b/1\,000C$

对方坯料　$P = 0.5KH^3\sigma_b/1\,000C$

式中，P为冷折力，N；D为圆料直径，mm；H为方料边长，mm；C为支座间距，mm；σ_b为强度极限，MPa；K为调整系数0.8～1.1。

冷折生产率高，几乎没有刀口损耗，但是长度尺寸精度差。冷折适用于较高硬度的钢材下料。也可预热折断，如轴承钢折断时要预热280～330℃。

4）其他下料方法

① 气割下料。用乙炔、丙烷或汽油气等可燃气体与氧混合燃烧生热切断坯料。该法切口损失约4～8 mm，断面质量较差，并伴有氧化、脱碳现象，而且劳动条件较差。一般用于大截面坯料的下料。

② 车削下料。用切削加工方法切断坯料，尺寸精度高，断面质量好，但生产率低，切口损失大，所以，没有特殊要求一般不予采用。

③ 摩擦锯切。借助无齿锯片与坯料摩擦生热的机制将坯料熔化切开，锯片速度达100～140 m/s，送进速度大于200～500 mm/min。该方法噪声大，劳动条件差，动能消耗大，切口损耗大，一般情况下不推荐使用。

此外还有电机械锯切割，将坯料与锯片接上电源，锯切时在接触点上产生电弧将坯料局部熔化，从而达到切断坯料的目的。

电火花切割工作原理是将坯料接正极、锯片接负极，在电解液中切割时，锯片与坯料之间产生电火花从而将坯料切断。

5）精密剪切下料　由于精密塑性成形技术的发展，无飞边模锻，精确锻造，近净成形，冷、温挤压及精密辗压等工艺的广泛应用，对提高下料断面质量，提高劳动生产率，控制坯料的重量和尺寸公差的要求越来越高，因此精密剪切受到关注。

精密剪切下料方法很多，大致可归纳为两大类型：其一是在现有的锻压设备上，采用精剪模具改进下料质量；其二是采用精剪设备和新的综合措施，特别是计算机控制下料技术，全面提高下料质量和生产效率。

常见棒料精密剪切技术有：径向夹紧剪切、轴向加压剪切、高速剪切、冷热精密剪切等。

① 径向夹紧剪切。径向夹紧剪切与传统的开式模剪切对比，坯料切断面质量有明显的提高。其技术要点：

a）需要径向夹紧力。对45、40Cr、20CrMnTi、42CrMo、20Mn等碳素钢和合金结构钢的热轧棒料，合适的夹紧力F_i与剪切力F之间的关系为：

$$F_i = (0.7\sim1.0)\ F$$

b）剪切力较大。在剪切过程中，由于棒料被径向夹紧，限制了剪切区金属的轴向伸长，自发引起轴向压缩力F_b。若径向夹紧力按上述范围取值，则该轴向力约为剪切力的1/4。由于轴向力的作用，导致剪变形区静水压应力增大，塑性提高，故剪切力增大。此外，由于径向夹紧使坯料抗剪强度增大，其值约为普通剪切的1.1～1.3倍。

c）径向夹紧剪切模的基本结构如图2.1-38所示。在剪切过程中，由于剪切区金属力图轴向伸长，但因棒料8被1、5压紧块夹持，其伸长移动受到前、后挡板3、6的阻挡，于是自发形成轴向压缩力，从而提高剪断质量。此外，径向夹紧机构，使棒料在剪切时处于被夹紧状态，而一旦棒料剪断，会立即放松，使棒料得以自由移动，以免发生揉挤擦伤。这种剪切方法，当毛坯的长径比大于0.7时，剪切质量稳定；小于0.7时，剪切质量将会恶化。



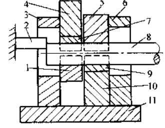


图 2.1-38 径向夹紧剪切模结构示意图
1—下压块；2—挡料；3—后挡板；4—活动压块；5—压紧块；6—挡板；7—动刀片；8—棒料；9—固定刀片；10 固定刀片座；11—底板

棒料径向夹紧可采用差动式、楔块式和液压夹紧等。

对于冷拔棒料，因为直径公差小，可采用套筒模剪切。即动刀和静刀皆为筒模，这样在棒料剪切过程中产生的弯曲、移动被限制于套筒模和棒料的径向间隙范围之内，不能自由移动，因而剪切质量比传统的开式剪切有明显的提高。

② 轴向加压剪切。由于轴向加压将使剪切变形区的静水压力增高，改善了坯料的塑性，防止了脆性断裂缺陷，提高了剪切质量，但是因为剪切间隙小，坯料轴向受力镦粗可能将刀孔堵塞，所以，在剪切之后需要用力将毛坯顶出，并加力将棒料送入。顶出力大致为轴向力的5%～10%。

采用多刃剪切的方法一次可剪成几个毛坯，如图2.1-39所示。由于坯料同时剪切，相互约束限制了棒料的轴向伸长移动，也能达到轴向加压的效果。可是，端头剪切面约束不完善，所以剪切质量较差。而中部剪切轴向约束力较大，剪切质量较好。

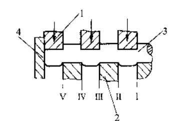


图 2.1-39 多刃剪切模示意图
1—动剪刀；2—静剪刀；3—棒料；4—挡板

图2.1-40所示为一种轴向加压剪切方式。其原理是将被剪棒料轴向压紧在动刀片的封闭孔内，由于坯料剪切时受到挡料器约束和剪刀孔的限制，受力变形状态大为改善，剪切质量比开式剪切有明显的提高。

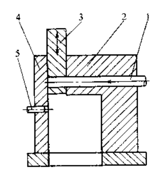


图 2.1-40 轴向加压剪切装置
1—轴向加载棒料；2—定刀剪切模；3—封闭动刀片；4—挡料定位器；5—顶出器

图2.1-41所示为液压传动的轴向加压剪切装置，它每分钟可剪直径为25～30 mm、长度为50 mm的棒料20～30件。其主要组成部分是：送料缸1、剪刀夹紧缸2、棒料夹紧缸3、剪切缸4以及轴向加压缸5，均由电磁阀控制。整个液压系统可以完成手动、单次循环或自动操作。

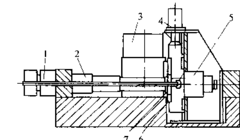


图 2.1-41 轴向加压剪切装置

为了便于送料，棒料直径应小于剪刀孔径。但在剪切过程中，由于轴向加压的结果，棒料会产生径向膨胀，将棒料与剪刀模孔间的空隙填满，使切下的坯料或棒料分别卡在动剪刀6和静剪刀7的模孔内。因此，为了从动剪刀中推出坯料以及棒料的再次送进，该装置中的轴向加压缸5与送料缸5的压力必须很大，才能完成毛坯的顶出和棒料的继续送进。

③ 高速剪切。高速剪切可以明显改善断面质量，一般认为当剪切速度达到5～15 m/s时，剪切断面质量可以满足精锻成形要求，因此，在普通锻锤及高速锤上安装精剪模具就可进行精密剪料。但是高速剪切时有噪声危害，模具寿命较低。

④ 精密剪切机。精密剪切机在国内外发展都比较快，而今已形成许多系列。例如，日本的MSR系列精密棒料剪切机，当坯料长径比 L/d 为0.5、1和3的时候，其剪切长度公差为±0.7、±0.2、±0.1 mm。其中MSR-32精密剪切机可剪棒料直径 $\phi5$～$\phi30$ mm，剪切速度达到1 000 mm/s，行程次数125件/分。德国的HT系列棒料剪切机，剪料直径 $\phi11$～$\phi64$ mm，当剪切长径比 $L/d>1$～1.5时，长度公差±0.15 mm。法国精密剪切机下料长度公差达±0.6 mm，斜度<1°。俄罗斯NP-40型棒料剪切机配备有横向夹紧和防弯曲装置，可减少端部裂纹，保证下料质量。德国的Caddy32-140系列棒料剪切机，配有计算机控制系统，可按下料体积精度和重量精度进行精密剪切，用于紧密公差的温精锻下料。我国济南铸锻机械研究所生产的预偏角精剪机及台湾生产的精剪机等剪切质量良好，具有经济适用的特点。

⑤ 热精密剪切下料。将棒料加热到锻造温度，然后剪切下料，接着锻造成形。这种热剪切下料有两种形式。其一是在多工位自动压力机的下料工位处剪料。其二是在棒料感应加热器出口处配套热剪切机，组成加热、剪切下料生产线。上述下料方法具有节能、勿需搬运、精确剪切的优点。尤其是热剪切与计算机称量技术结合起来，能够获得更大的技术经济效益。图2.1-42所示为计算机控制棒料剪切系统。

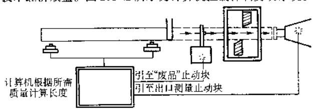


图 2.1-42 计算机控制棒料剪切示意图

在需要改变坯料下料体积时，可按测量仪器提供的信息自动调节下料尺寸。即计算机根据下料重量、体积，按不同的棒料规格自动调整下料尺寸，其重量偏差在±1%以内。

2.3 坯料加热及加热规范

（1）坯料加热的目的及方法

锻造前坯料加热的目的是提高金属的塑性，降低变形抗力，以利于坯料变形并获得良好的组织性能。

锻压生产所用的加热方法，按热源不同可分为两大类：

1）火焰加热　它是利用燃料（煤、油、煤气等）燃烧所产生的热能来加热金属材料的方法。其优点是：燃料来的方便，炉子建修方便，费用低，适用性强，应用较普遍。缺点是：劳动条件差，加热速度慢，加热质量差，烟尘污染环境。

2）电加热　它是利用电能转换为热能来加热金属的方法。与火焰炉对比，优点是：劳动条件好，加热质量高，温度便于调节控制，易于实现机械化、自动化，而且污染小，环保卫生，符合文明生产的要求，应该推广应用。但是，目前电力系统投资还比较贵，有的地方用电不便，因面应用还不普遍，随着电力事业的发展这个问题会得到解决。

（2）金属在加热时的变化

金属在加热过程中，不仅组织结构、力学性能、物理性质会发生一系列的变化，而且会产生一些加热缺陷。这些变化对塑性成形过程和产品质量都有重要的影响。

1）力学性能的变化　随着加热温度的升高，力学性能的变化，总的趋势是塑性指标提高而强度指标降低。但是在不同的温度下组织结构发生不同的变化，力学性能相应发生起伏波动。图 2.1-43 列出了 T7 钢和 15 钢伸长率 δ 和强度极限 σ_b 随着温度升高的变化情况。由图可知，高碳钢与低碳钢在加热过程中有脆性出现。

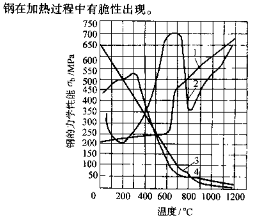


图 2.1-43　钢的力学性能与温度的关系

图 2.1-44 为 45 钢热拉伸时力学性能的变化。由图可知，当加热温度过高，晶界出现融化现象，断面收缩率下降为零，不能进行塑性加工。当液膜覆盖所有晶界，金属丧失机械强度成为废品。因此，制定加热工艺时，既要考虑温度升高抗力降低易于成形，又要防止加热温度过高，产生烧坏破裂造成废次品。

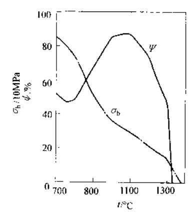


图 2.1-44　45 钢高温力学性能的变化

2）物理性质的变化

① 热导率不仅随金属的化学成分而异，而且加热温度不同也会发生变化。碳素钢的热导率随温度的增高而减小，高合金钢则稍有增大。但是，当温度大于 800℃后基本趋于一致，图 2.1-45 表示各种钢导热率的变化。

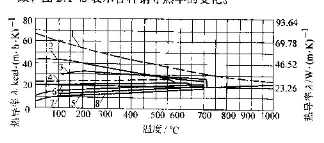


图 2.1-45　热导率的变化

② 比热容。钢的热容量取决于其化学成分与温度高低。表 2.1-11 表示出钢的平均比热容 c_p [kJ/(kg·K)]。

③ 密度与体胀系数。钢的密度（ρ）和体胀系数（β）与化学成分和温度有关。例如

纯铁　$\rho = 7\ 880\ kg/m^3$

铸铁　$\rho = 7\ 500 \sim 7\ 800\ kg/m^3$

钢材　$\rho = 7\ 850\ kg/m^3$

合金钢　$\rho = (7\ 800 + \Delta\rho x)\ kg/m^3$

表 2.1-11　碳素钢的平均比热容　/kJ·(kg·K)⁻¹

温度		碳素钢含碳量（质量分数）/%								铸铁
℃	K	0.09	0.224	0.300	0.540	0.610	0.795	0.950	1.410	
100	373.15	0.465	0.465	0.469	0.473	0.477	0.481	0.494	0.486	0.526
200	473.15	0.477	0.477	0.481	0.481	0.486	0.486	0.502	0.494	0.544
300	573.15	0.494	0.498	0.502	0.507	0.511	0.515	0.519	0.515	0.565
400	673.15	0.515	0.515	0.515	0.523	0.523	0.528	0.536	0.528	0.574
500	773.15	0.532	0.532	0.536	0.536	0.540	0.544	0.553	0.544	0.586
600	873.15	0.565	0.565	0.565	0.574	0.574	0.574	0.582	0.578	0.603
700	973.15	0.599	0.599	0.603	0.603	0.607	0.607	0.615	0.607	0.653
800	1 073.15	0.666	0.678	0.691	0.691	0.687	0.678	0.691	0.682	0.691

续表 2.1-11

温度		碳素钢含碳量（质量分数）/%								铸铁
℃	K	0.09	0.224	0.300	0.540	0.610	0.795	0.950	1.410	
900	1 173.15	0.708	0.703	0.699	0.691	0.687	0.678	0.670	0.674	0.712
1 000	1 273.15	0.708	0.703	0.699	0.691	0.687	0.678	0.653	0.674	0.716
1 100	1 373.15	0.708	0.703	0.699	0.691	0.691	0.682	0.662	0.678	0.720
1 200	1 473.15	0.708	0.708	0.703	0.695	0.691	0.687	0.662	0.678	0.724
1 250	1 523.15	0.708	0.708	0.699	0.695	0.695	0.687	0.662	0.678	

式中，$\Delta\rho$ 为合金元素对密度变化的影响；x 为合金元素的含量（质量分数），%。

④ 导温系数。导温系数表示钢在加热过程中温度的变化速度。可由下式决定。

$$a=\frac{\lambda}{c_p\rho_t}$$

式中，a 为导温系数，m²/s；ρ_t 为钢在 t℃时的密度

$$\rho_t=\frac{\rho}{1+\beta t}$$

式中，β 为钢的体胀系数，℃⁻¹。

在 600℃时　$\beta=0.5\times10^{-4}$

在 800℃时　$\beta=0.7\times10^{-4}$

3）加热缺陷的生成

① 氧化、脱碳。钢在加热的过程中，由于氧化性气体（如 O_2，CO_2，H_2O 等）与铁（Fe）发生氧化反应生成氧化铁皮。

氧化皮不仅造成金属烧损（火焰加热每次大约烧损1.5%～3%），而且硬而脆的氧化铁皮压入锻件，形成斑疤、落入模膛，加剧模具磨损。炉底处氧化铁皮导致耐火材料腐蚀破坏。因此加热氧化是一种严重加热缺陷。

为了预防氧化，首先要防止氧化性炉气与钢料接触，如控制炉气成分，减少炉气中氧化性成分。实行介质保护加热可以减少氧化。其次加热温度超过 900～950℃时氧化剧烈，加热时间越长，尤其是高温停留时间越长，则氧化皮越厚。所以，采用快速加热，可以减少氧化损失。电加热能调节加热气氛，控制加热温度与时间，因而加热缺陷较少。

钢料表层中的碳被烧蚀的现象称为脱碳。脱碳对加工余量较小的精锻件表面质量有不良的影响。一般防止氧化的措施，同样可以防止脱碳。

② 过热、过烧。当加热温度超过始锻温度或在高温下停留时间过长，则会引起晶体急剧长大，这种现象称为过热。钢料过热后不仅塑性降低，不利于成形，而且在锻后冷却时还会生成魏氏组织（过共析钢），导致锻件强度和冲击韧性大大降低。

如果加热温度高于过热温度或在高温下长时间停留，则氧化性气体进入晶界，使晶间低熔点物质局部熔化，破坏了晶粒间的结合，使坯料丧失了机械强度，成为烧坏的废品。

含碳量提高容易引起过热过烧，而铬镍元素含量高，不易发生过烧。含碳量为 0.5% 的碳钢，过热温度为 1 300℃，过烧温度为 1 350℃；铬镍钢过热温度为 1 100～1 150℃，过烧温度达 1 400℃。

（3）金属锻造温度范围的确定

锻造温度范围是指始锻温度至终锻温度之间的区间。

确定锻造温度范围的原则是：金属在该温度区间内锻造时，应该有良好的塑性和较小的变形抗力，并且能获得优良的组织性能。在此前提下尽量扩大锻造温度范围，减少加热火次，提高锻造生产率。

确定锻造温度范围的方法是：以金属平衡图为基础，结合塑性图、抗力图和再结晶图，从组织结构、塑性与抗力等方面综合分析，合理定出始锻温度。

一般来讲，各种碳钢的锻造温度可由铁碳平衡图确定。而大多数合金结构钢也可参照与其含碳量相当的碳钢来考虑。对于一些塑性低，相结构复杂及一些没有相变的材料（如高合金钢、奥氏体钢、铁素体钢等），还要进行热变形实验，建立塑性图、抗力图、再结晶图，然后全面分析确定合适的锻造温度范围。

① 始锻温度的确定。要求尽量避免过热，绝对不能过烧。碳钢始锻温度一般比铁碳平衡图中固相线低 100～200℃，此外还应考虑变形工艺与组织结构等因素。如以钢锭为坯料时，由于铸态组织比较稳定，过热倾向较小，于是始锻温度比同种钢材略高。高速锤锻造时，因为高速变形，热效应明显，锻造时坯料温度会升高，所以始锻温度应略低。对于无相变钢或剩余锻造比不大的锻件，则始锻温度应考虑锻造工作量大小，尽量不要高温终锻，以免晶粒粗大不均匀。

② 终锻温度的确定。过高温度终锻，会造成晶粒粗大。过低温度终锻，则容易开裂并产生附加应力。

图 2.1-46 表示了碳钢锻造温度范围的确定原理。对于共析钢在奥氏体高塑性相区锻造，对于过共析钢在双相区终锻是为了打碎钢中的二次碳化物，使其弥散分布，改善锻件质量。

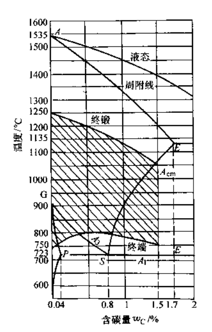


图 2.1-46　碳钢的锻造温度范围

（4）加热时间的计算

1）薄材和厚材的概念　在加热过程中坯料表面与内部有温度差。如果断面上温差很小，可忽略不计者称为“薄材”。若温差大，不可忽略者称为“厚材”。一般用毕欧准数判定

$$B_i = \frac{\alpha_{\Sigma}\delta}{\lambda}$$

式中，α_{Σ}为综合给热系数；λ为热导率；δ为传热厚度；B_i为毕欧准数，$B_i \leqslant 0.25$为薄材，$B_i \geqslant 0.5$是厚材，$B_i = 0.25 \sim 0.5$为过渡区。

在室式炉内加热也可按图 2.1-47 区分薄材与厚材。

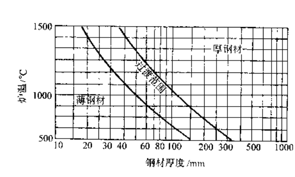


图 2.1-47　薄材与厚材的区分

2）薄材加热时间计算　当加热温度小于或等于 1 200℃且按室式炉允许的最大加热速度加热，则加热时间τ可按下式计算：

$$\tau = \frac{Gc_p}{\alpha_{\Sigma}A}\ln\left(\frac{t_L - t_s}{t_L - t_x}\right)$$

式中，G为钢材重量，kg；c_p为平均比热容，kJ/（kg·℃）；A为钢材受热面积，m^2；t_L为炉温，℃；t_s为钢材初始温度，℃；t_x为加热终了温度，℃；α_{Σ}为综合给热系数，W/（m^2·K）。

综合给热系数α_{Σ}可由图 2.1-48 查知。

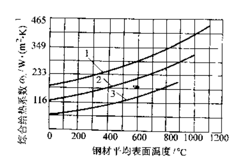


图 2.1-48　综合给热系数 α_{Σ}

1—t_L = 1 300℃；2—t_L = 1 100℃；3—t_L = 900℃

当加热温度大于 1 200℃时，按综合辐射传热计算，忽略影响不大的对流传热：

$$\tau = \frac{100Gc_p}{A\sigma\left(\frac{T_L}{100}\right)^3}\left[\varphi\left(\frac{T_x}{T_L}\right) - \varphi\left(\frac{T_s}{T_L}\right)\right]$$

式中，σ为导来辐射系数，W/（m·K^4），当加热温度为900～1 300℃时$\sigma = 3.5 \sim 4$，当加热温度为$\leqslant$900℃时　$\sigma = 2.9 \sim 3.5$；$\varphi\left(\frac{T_x}{T_L}\right)$、$\varphi\left(\frac{T_s}{T_L}\right)$为函数，查图 2.1-49 定。

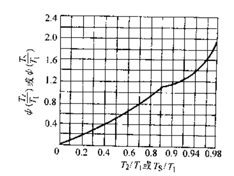


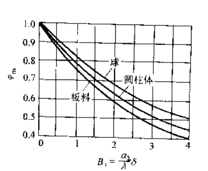
图 2.1-49　$\varphi\left(\frac{T_x}{T_L}\right)$、$\varphi\left(\frac{T_s}{T_L}\right)$值

$$T_1 = t_L + 273\ \text{K}$$
$$T_s = t_s + 273\ \text{K}$$
$$T_x = t_x + 273\ \text{K}$$

3）厚材加热时间计算　当加热温度$\leqslant$1 200℃时

$$\tau = \frac{Gc_p}{\alpha_{\Sigma}A\varphi_m}\ln\left(\frac{t_L - t_s}{t_L - t_x}\right)$$

式中　φ_m——修正系数，按图 2.1-50 定。



$B_i = \frac{\alpha_{\Sigma}}{\lambda}\delta$

图 2.1-50　修正系数 φ_m

当加热温度 > 1 200℃时，

$$\tau = \mu MK\delta^{\frac{3}{2}}$$

式中，δ为钢材传热厚度，m；K、M、μ为材质系数、装炉系数、尺寸系数，可查相关手册。

4）加热时间计算图表　对小型坯料（断面尺寸 10～100 mm）的加热时间可查相关手册。

若为中高合金钢及工具钢，则加热时间按下式计算：

$$\tau = KK'\tau'$$

式中，τ'为基本加热时间；K为材料系数，合金钢和碳素工具钢$K = 1.2 \sim 1.5$，高合金钢和合金工具钢$K = 1.5 \sim 2.0$；K'为坯料形状系数，可查相关手册。

对断面尺寸为 100～350 mm 方坯的加热时间，可查相关手册。

（5）钢锭和钢坯的加热规范

冷钢锭、热钢锭和钢坯的加热规范可查相关手册。

加热时，钢锭表面温度为室温者叫冷锭。表面温度高于 550～600℃者为热锭。因冷、热钢锭性质不同，严禁冷、热钢锭同炉加热。

钢锭加热时，不允许在高温下长时间保温。若超过规定保温时间，仍不能出炉锻造者，炉温应降至 750～850℃。

随着钢铁冶金质量的不断提高，以及锻造、热处理技术的进步，加热工艺的发展趋势是提高加热温度，缩短加热时间，扩大锻压温度范围，以提高效率，节约消耗。因此，现

用加热制度应随科学技术的进步和生产水平的提高而不断地进行调整与修订。

3 大型锻件的锻造特点

大锻件多数安装于重大装备的关键核心部位，是十分重要的基础件，例如火电设备中的转子、护环；水电设备中的水轮机主轴；核电用的管板、封头、压力壳；冶金工业中的轧钢机轧辊；石化工业中的反应器筒体；船舶工业的曲轴、舵杆；国防工业中的重型武器；航空航天中的重要承力件；重型机器中的大轴、立柱、高压缸，以及大型轴承圈、模块、轮轴坯等重要产品。因此大锻件制造的科技水平、生产能力、技术经济指标往往成为衡量一个国家工业发展水平和国防实力的重要标志之一。

我国十分重视大型锻件制造业的发展，目前已经形成了相当规模和能力。20世纪90年代中期成功生产了600 MW成套电站大锻件、千吨级石化压力容器、7万吨级远洋巨轮大锻件等产品，满足了社会经济发展的急需。在科技方面经历了从简单模仿到研究开发，从生产代科研到生产促科研的转变。特别是形成了一个理论密切联系生产，产、学、研联合攻关的良好氛围。不仅制造了一批关键产品，而且应用铅、塑性泥、密栅云纹、光塑性等物理模拟技术，对轴类锻件的FM、WHF、JTS、KD等锻压方法的原理和参数进行比较深入的研究，对管板类锻件中间密集裂纹进行了分析；对坯料中的空洞、疏松、杂质等缺陷在锻造过程中的锻合压实规律进行了探讨。同时应用有限元数值模拟技术、工程优化技术，对锻压机制进行了定量研究。应用通用软件如MARC、DEFORM及UG等开展了CAD、CAE及成形分析工作。近期又将热力学模拟、微观模拟和计算机数值模拟集成，建立了金属热成形现代研究方法，已经对塑性成形的力能参数、晶粒度及缺陷演变进行了数字化分析，提供了变形过程信息与制件各处的场量信息，也能动态演示。在科学认识大型锻造机制的基础上，逐步开展了质量预报、缺陷预警、工艺优化、控制成形、控制冷却、短流程工艺、复合成形以及新技术开发等工作，促进了大型锻造的科学化、现代化的发展进程。在钢锭凝固结晶、锻压新技术、锻后处理方面取得了许多新的成果。但是，目前我国的大锻件生产，在质量、品种、成本、交货期、研发能力方面，还不能满足社会经济飞速发展的要求，还不能适应市场激烈竞争的态势，所以必须在体制改革、结构调整、经营管理、科技开发、节能降耗、提高质量、增加效益和人才培养等方面努力前进，赶上世界先进水平。

3.1 大型锻件的生产特点

1）技术要求严　由于大型锻件多数是机器中的关键件，其地位作用重要，受力复杂，工况环境特殊，因此对组织性能、安全可靠性与使用寿命提出了十分严格的要求。随着科技的进步和制造工业的发展，特别是重大装备向高性能、高参数、大型化方面发展的趋势，对大锻件的要求越来越高。为此不仅要求精化尺寸、节约材料，更重要的是要严格控制生产过程，确保高性能、高质量。

2）制造难度大　大型锻造涉及冶炼、铸锭、加热、锻压、粗加工、热处理、质量检查等众多生产环节。工艺复杂，周期冗长，连续性强，劳动密集，技术含量高，生产制造难度大。而且大锻件多为单件小批生产，品种、等级经常发生变化，所以，必须科学地管理，合理地协调配合，不断改革、创新，才能实现优质、高效、低成本的要求。

大型锻件形体巨大，不均匀性凸显。锻压过程属于高温、高压、非稳态、多因素状况，很难进行测试与实验研究。因此，传统大锻件生产中存在一些不科学的、落后的技术，研究方法陈旧，因而急需以高新技术对大型锻造中的难点、热点课题进行创新研究与开发。大型锻造科学化与现代化是当前应该关注的攻关课题。

3）投资大，污染重　大锻件生产占用许多重型设备，原材料、能源、工装辅具、劳动力消耗巨大，生产周期长，环境污染严重。所以研究如何提高产品合格率，材料的利用率，节能降耗，降低成本，提高效益等，对提升生产水平具有重要的意义。由于大锻件生产中高能耗、重污染、繁重劳动的特点，应该采用新的技术控制生产过程，优化工艺，并注意污染治理和环境保护，注意采用机械化改善劳动条件，注意采用高新技术不断提高大锻件制造业的适应性与竞争力。总之，要使大锻件产业沿着新型工业化的道路取得较大的进展。

3.2 大型锻造的工艺特点

大型锻件制造的技术特点主要体现在以下方面：大锻件一般用钢锭直接制造；钢锭的冶金质量、组织结构，对锻压成形过程和锻件质量有重要的影响；由于大型钢锭尺寸大，缺陷多，不均匀性凸显，因此加热时容易产生裂纹、粗晶等缺陷，所以应制定严格的加热规范。

大锻件在锻造过程中，不仅要注意形状尺寸，更要关注内部组织结构的演变，而且通过锻造改善组织性能是大锻件生产中的主要矛盾。

大锻件形体巨大，组织结构粗大不均匀，加上扩散氢气，消除应力比较困难，所以锻后冷却与热处理制度复杂而且周期冗长。

大锻件多为受力关键件，必须有完善的质量保证体系和全面的质量检验项目，以保证其安全可靠性。

大型锻造的工艺特点和钢锭冶金质量及其在热锻时的变化有密切的关系。

1）大型钢锭的冶金特点　提高钢锭冶金质量的主要因素有：钢液纯净度要好，比如硫、磷有害元素要少，氢、氧等有害气体和非金属夹杂物要少，随着冶炼技术的发展，尤其炉外精炼技术的广泛应用，钢中杂质明显下降。例如，目前重要大锻件用钢中，硫、磷含量已降至双零以下。其次，结晶结构要合理，随着铸锭技术的进步、钢锭凝固结晶能够加以控制，内在质量显著提高。

但是，大型钢锭冷凝结晶的热力学和动力学条件相差很大，造成钢锭组织结构、化学成分及杂质分布很不均匀，随着钢锭尺寸的增大，这种不均匀程度更加严重。

钢锭的结晶组织特征为：表层冷却快，为等轴细晶粒区。内层定向凝固为柱状晶区及向上倾斜的树枝晶区。心部冷却慢，为粗大等轴晶区，此处杂质聚集、疏松较多。上部冷却最慢，缩孔、疏松、低熔点夹杂物最多。因此，锻造时应保留外层，锻透心部，全部切除冒口和底部。

大型钢锭内部宏观缺陷主要有偏析、非金属夹杂、有害气体、疏松与缩孔等。钢锭愈大上述缺陷愈严重。钢锭存在上述缺陷往往是锻件报废的重要原因。为此应该制定合理的锻造工艺，科学的控制热力学因素，通过锻造变形消除或减少钢锭缺陷，提高和改善锻件的组织性能。

2）锻造对钢锭组织结构的影响　钢锭在锻造过程中铸态结构被打碎生成锻造组织，金属在受力变形过程中发生动态再结晶。在锻后冷却时，还会发生静态再结晶和晶粒长大，杂质扩散等情况。下面介绍锻造过程中钢锭组织结构的变化。

①消除铸态粗晶，如图2.1-51所示。钢锭经过热锻，粗大树枝晶、柱状晶被打碎，坯料在高温大变形情况下发生再结晶，形成新的比较致密细小的锻造组织。对于多火次锻

造成形的大锻件，要控制最后一火的锻造工艺参数，以期获得细小均匀的锻造组织。对于不能通过热处理细化、匀化晶粒结构的材料，更要控制热锻压工艺，调控出合理的应力应变场、温度场，控制塑性流动和再结晶过程，从而获得要求的组织结构状态。

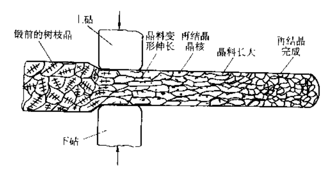


图 2.1-51　钢锭锻造中组织结构的变化

② 改善碳化物与夹杂物在钢中的分布状态。锻造能破碎聚集的碳化物、非金属夹杂物和其他过剩相组织，再加上高温扩散和相互固溶作用，使之均匀弥散分布，因而改善了金属组织结构，提高了力学性能。例如：高速钢刀具坯料、高铬钢轧辊、奥氏体钢护环都是通过反复大变形，合理调整热变形参数，达到提高质量的目的。

③ 形成纤维组织。钢锭锻造时，沿主要塑流方向，晶粒被拉长。脆性氧化物杂质被击碎成链状分布，塑性硫化物夹杂被拉长呈连续分布，多数过剩相沿主变形方向分布。晶界物质的这种分布状况再结晶后也不会改变，于是在锻件中形成纤维组织（流线）。

在拔长工序中，锻造比大于 2～3 便会出现纤维组织。如果镦粗后拔长，则锻造比要达到 4～5 才能形成纤维组织。

锻件中明显的纤维组织会使力学性能和理化性质出现方向性。当钢中存在大量非金属杂质时，还会产生层状断口，导致横向力学性能严重下降。

流线在锻件内的分布状况对锻件使用性能影响很大。例如受力简单的立柱，流线方向应与最大拉应力一致，而受力比较复杂的曲轴、轧辊等流线方向应与剪应力垂直。对比较容易疲劳磨损的模块、轴承圈等，流线分布最好与工件表面相适应，以防工作时形成应力集中萌生裂纹。对要求有综合使用性能的重要大锻件，不希望有明显的纤维组织。

④ 压实、锻合孔隙性缺陷。钢锭内存在有孔隙性和类孔隙性缺陷。锻合、压实这些缺陷是大型锻造的重要任务。国内外对此进行了大量的研究，取得的共识是锻合、压实孔隙性缺陷必须具备三个条件：足够高的温度，良好的压应力状态，一定的变形程度。

最近我国又提出了类生修复孔隙性缺陷的新概念。研究指出大锻件内一定尺寸的缺陷，在能量足够时，会产生类似动物骨折修复愈合的现象，并进行了验证试验。

3.3　提高大型锻件质量的工艺措施

提高大锻件质量首要的也是最根本的环节，是提高原材料的冶炼质量和铸锭质量，这已为国内外大量事实所证明。我国在 20 世纪 80 年代，由于采用了炉外精炼和铸锭新技术，大幅度提高了钢锭的质量，许多重要大锻件质量水平稳步提升，达到了国外同类产品的先进标准。

改进锻造工艺是一个很重要的环节。因为要想优质、高效、低成本制造大锻件，必须不断优化工艺方案，采用新技术、新工具。而新技术的开发，工艺参数的优化，离不开对塑性成形机制的科学认识，因此应用高新技术武装大锻件制造业，以现代研究方法深入分析大型锻造过程，对改革锻造技术具有重要的意义。

通过改变钢锭锭型、坯料形状、工具结构、操作方法以及利用坯料中不均匀温度场，造成有利的应力状态和变形状态，控制塑性流动，锻合压实内部缺陷，从而达到改善组织结构，提高力学性能的目的。上述研究工作不仅符合塑性加工进步方向，而且勿须大量的投入。这样的先进适用技术是目前应该注意开发的课题。

1）改变锭型与坯料形状　例如：采用空心钢锭锻制空心锻件，操作时间可减少 1/2～1/3，节省材料消耗 20%～30%。采用电渣熔铸毛坯，可以锻造异形锻件，不仅变形流动合理，而且节能，节材。

2）采用新型砧子　例如：采用凸型砧，能够减小砧下困难变形区，提高变形的均匀性。采用异型砧或能控制塑流方向，或能产生有限的剪变形，增加变形效果。

3）宽砧高温强压（WHF）锻造法　以增宽的平砧在高温下对坯料进行大压下量锻造，有利于锻坯内部孔隙性缺陷的压实、锻合。实际应用的参数为：按设备能力尽量增大砧面宽度，满砧送进（送进量不小于砧宽的 70%～90%），压下率为 20%～30%，砧宽比为 $W/H_0 \geqslant 0.6 \sim 0.9$。有的研究认为：平砧拔长矩形截面毛坯，如果砧宽比 $W/H_0 \geqslant 0.8 \sim 0.9$ 时，则轴向无拉应力；料宽比（B/H_0）控制在 0.85～1.18 时，则横向无拉应力。

4）FM 锻造法　FM（即 Free from Mannesmann effect）锻造法亦称中心无拉应力锻造法。其特点是上砧为普通平砧，下砧为宽平台。由于不对称的砧型配置，锻压时产生不对称变形，中部拉应力位置下移，如图 2.1-52 所示。这样钢锭心部缺陷较多的部位将避开拉应力的破坏作用，不致在锻件中心形成缺陷。

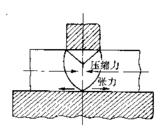


图 2.1-52　FM 锻造法原理

FM 法实用工艺参数配对为：$W/H_0 \approx 0.6$ 则 $\varepsilon_h \approx 14\% \sim 15\%$；$W/H_0 = 0.7$ 则 $\varepsilon_h = 22\%$。也有研究认为：选用毛坯尺寸比为 $H/B = 1.2$，当砧宽比为 $W/H_0 = 0.42 \sim 0.48$，锻压时坯料内不出现轴向拉应力；料宽比为 $B/H_0 = 0.83 \sim 1.20$ 不出现横向拉应力。

5）中心压实法　此法最先由日本的馆野万吉和鹿野昭先生提出，亦称 J·T·S 法，又称表面降温锻造法。它是先将坯料加热到允许的最高温度，然后采用强制降温（吹风、喷雾或空冷）。当表层温度下降而中心仍处在高温时，用窄平砧沿坯料纵向加压。在表层低温硬壳的限制下，中心承受强烈的三向压应力作用，得到类似于闭式模锻一样的变形效果。

中心压实锻造法的变形方式如图 2.1-53 所示。

研究表明，坯料内外温度差由 0℃增至 250℃时，中心静水压应力增加了 3 倍左右，且大变形区向中心集中，加之



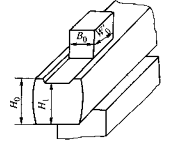


图 2.1-53　中心压实锻造变形方式

中心处于 1 050℃左右的高温状态下，造成了最有利于锻合、压实孔隙性缺陷的热力学条件。因而锻合中心缺陷所需的临界压下量将减少 28%左右。

依据中心压实的效果提出最佳工艺参数为：断面温度差 $\Delta t = 230 \sim 270$℃。砧宽比，$B_0/H_0 = 0.7$，$W_0/H_0 = 0.6$，单而加压 $\epsilon_h = 13\%$，双面加压 $\epsilon_h = 7\% \sim 8\%$。图 2.1-54 表示了锻坯内等效应变的分布状况。

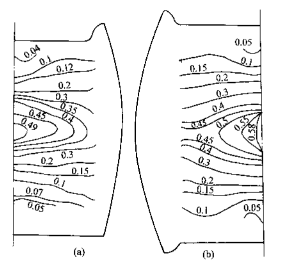


图 2.1-54　中心压实法锻坯内等效应变场

6）型砧拔长　常用的拔长型砧有：上下 V 型砧、上平下 V 型砧和上下圆弧砧等。

型砧拔长与平砧拔长对比，锻坯横向流动少，拔长效率高，且操作翻转方便。当砧宽和压下量合理时，坯料内孔隙性缺陷也能很好地闭合。

生产中上下 V 型砧拔长工艺参数为：砧宽比 $W/D_0 = 0.6 \sim 0.8$，压下率 $\epsilon_h = 15\% \sim 22\%$，V 型砧工作角 $\theta = 120° \sim 135°$。

我国曾用宽砧大压下量锻造法（亦称 KD 锻造法）成功地在 120 MN 锻造水压机上锻成了 200 ~ 600 MW 重型转子锻件。主要技术参数为：平砧宽 1 200 ~ 1 700 mm，V 型砧宽 1 200 mm，工作角 135°，压下量 450 ~ 550 mm。

7）镦粗变形　为了保证中心有良好的压实效果，当镦粗前坯料的高径比 $H_0/D_0 = 2 \sim 2.5$ 时，压缩率为 $\epsilon_h \geq 40\%$，并且要求加热均匀。为了改善坯料变形的均匀性。可采用锥形板镦粗。

8）锻焊联合工艺　用小型钢锭锻成几个坯料，然后用电渣焊拼成大锻件，不仅减少了坯料的缺陷，而且锻造成形方便，所以，锻焊联合是制造大锻件的特种工艺。

9）严格控制锻后冷却和热处理过程　大锻件形体尺寸巨大，不均匀性凸显。缺陷多，塑性差，内应力大，温度分布、相变过程复杂，结晶结构不均匀，热扩散、氢气扩散十分困难，因此，冷却热处理工艺复杂，周期长，消耗大。加上大锻件工况条件特殊，质量要求严格，所以，锻后冷却和热处理工艺应该仔细制定，从严控制。另外冷却和热处理过程不仅要得到必要的组织性能，满足使用的特殊要求，而且还要细化、匀化组织结构，消除残余应力，扩散氢气，防止白点与裂纹缺陷。同时还要满足机加工、超声波探伤等质量检查的要求。

大锻件热处理不仅是耗能、耗时很多的工艺环节，而且又是决定最终质量的重要工序，因此必须正确制定加热、冷却制度，精心细致地操作，确保质量，杜绝浪费。

4　合金钢的锻造特点

为了说明合金钢的锻造特点，必须研究合金钢的类型。合金钢按组织结构的不同可以分为五类，如表 2.1-12 所示。

表 2.1-12　合金钢按基本组织分类

基本组织级别	常用钢号举例
珠光体级	45Mn2、60Si2、GCr15
马氏体级	Cr17Ni2、2Cr13、4Cr13
铁素体级	0Cr13、Cr25SiAl、Cr25Al5
奥氏体级	1Cr18Ni9Ti、Mn18Cr18N、4Cr14Ni14W2Mo
莱氏体级	W18Cr4V、W12Cr4V5Co5、Cr12MoV

其中高合金钢因合金元素含量多，组织结构复杂，所以锻造过程与锻件质量的控制尤为困难。

4.1　高合金钢的锻造特点

1）组织的多相性和结构的不均匀性显示。

2）再结晶温度高，再结晶速度低。

3）热导率较低，加热时低温阶段升温速度不能太快。

4）锻造温度范围窄。

5）硬化倾向大，变形抗力大。塑性低，易开裂，锻造性能差。

4.2　莱氏体高合金工具钢的锻造

莱氏体高合金工具钢主要包括高速钢和高铬模具钢等，常用来制作刃具及冷成形模具。这类钢中都具有一次共晶碳化物，对锻造及实用性能有重要的影响。

由于钢中含有大量的 W、Cr、Mo 等合金元素，能形成较多的复合碳化物且分布极不均匀，比如浇铸时一次共晶碳化物呈鱼骨状析出。这种网状成块团状碳化物偏析，不仅破坏了金属基体的连续性，降低了工具钢的耐磨性与红硬性，影响其使用寿命，而且在加热、锻造、热处理时，容易过烧，易于开裂、变形，晶粒粗大不均匀，影响热成形性能与锻件质量。此外，这类钢中的严重碳化物偏析还不能采取热处理方法消除，只能通过热轧或锻造来打碎并改善其分布。尤其对碳化物均匀性要求较高的工具，必须经过反复镦粗、拔长使碳化物细化并均匀分布才能制作刃具或模具。所以，根据使用要求科学合理的确定碳化物等级和锻造工艺是这类钢锻造中应该注意的问题。

碳化物均匀度的评级可参考表 2.1-13 和表 2.1-14。

1）莱氏体高合金钢的加热　由于高速钢在 1 300℃，Cr12 钢在 1 155℃时，共晶组织开始熔化，容易出现过烧缺陷，因面应严格控制加热温度。该类钢不仅对始锻温度过敏，而且对终锻温度高低也很敏感，过高容易产生萘状断口，过低容易产生裂纹。表 2.1-15 列出了部分国内外钢种锻造温度范围。

表 2.1-13 高速钢锻件碳化物均匀度要求

刀具名称	刀具直径/mm	碳化物均匀度合格级别≤
直齿插齿刀	<100 ≥100~160	3 4
齿轮滚刀 剃齿前滚刀 渐开线花键滚刀	≤100 >100~125	4 5
盘形剃齿刀	≤240	4

注：1. 带状和弯曲状碳化物均匀度评级合格级别图与碳化物均匀度合格级相间。
2. ≤240 mm 系指公称分度圆直径。

表 2.1-14 Cr12 钢锻件碳化物均匀度要求

工、模具名称	碳化物均匀度合格级别≤
一般模具（一般的冷冲模、冷挤模、拉丝模等）	4
重要工模具（重要的冷冲、冷挤模、搓丝板、滚丝模等）	3
特殊工具（冷挤冲头、小尺寸冷轧辊等）	2

表 2.1-15 部分莱氏体钢的锻造温度范围

钢种及钢号			预热温度/℃	始锻温度/℃	终锻温度/℃
高速钢	中国	W18Cr4V	800~900	1 100~1 150	900~950
		W12Cr4V4Mo	800~900	1 050~1 100	900~950
		W6Mo5Cr4V2	800~900	1 080~1 130	900~950
		W6Mo5Cr4V2Al		1 130~1 150	920~950
		W9Cr4V2		1 130~1 150	900
		W2Mo9Cr4V2		1 130~1 150	900
	美国	M1，M10	815	1 040~1 150	925
		M2（同 W6Mo5Cr4V2）	815	1 065~1 175	925
		M4	815	1 095~1 175	925
		M30，M34，M35，M36	815	1 065~1 175	955
		T1（同 W18Cr4V）	870	1 065~1 205	955
		T2，T4，T8	870	1 095~1 205	955
		T3	870	1 095~1 230	955
		T5，T6	870	1 095~1 205	980
	俄罗斯	P18		1 100	850
铬12型钢	中国	Cr12MoV		1 050~1 100	840~880
		Cr12		1 040~1 080	840~880
		Cr12V		1 040~1 080	840~880
	美国	D3（同 Cr12MoV）	900	980~1 095	900
	俄罗斯	X12M		1 070	850
		X12Φ1（同 Cr12V）		1 060	850

注：1. 预热温度栏中的空格是缺相应数据，不代表“不预热”。
2. 始锻温度的高限用于大截面锻件，低限用于小截面锻件。

由于莱氏体钢中合金元素多，偏析严重，导热性低，塑性差，因而加热时组织应力、温度应力大。所以，一般采用分段加热制度：冷锭装炉温度为 600℃，大截面坯料为 650℃，小截面尺寸坯料为 750~800℃。在 800~900℃时要停留，预热时间按 1 mm/min 计算。高温阶段快速加热，加热时间按 1 mm/0.5 min 计算。对于不需要反复镦拔的锻件，加热速度可快一些，直径小于 ϕ80 mm 者还可不预热，加热总时间按 1 mm/0.6~1 min 计算。

2）莱氏体高合金工具钢的锻造

① 钢锭开坯。开坯时必须先轻打、快打，改善表面塑性，然后重打，才不致产生裂纹破坏。开坯时一般采用“走扁方”拔长，要勤翻转，少送进，防止在一处重复锻击，并及时清除裂纹以防开裂报废。锻造比一般取 K_L = 7~8。

② 钢材改锻。变形程度的确定：

实践证明，就改善碳化物分布的效果而言，拔长优于镦粗，因此，对莱氏体钢反复镦拔时，一般只计算拔长的锻造比，总锻造比为各次拔长锻造比之和。此类锻件反复镦拔总锻造比为 K_L = 5~14。生产实践表明，锻造初期增加锻造比对改善碳化物均匀度有明显的效果，但当锻造比达到某一定值后再增加锻造比改善效果不再明显，具体情况如图 2.1-55 所示。

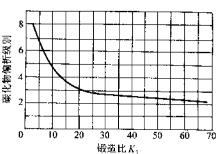


图 2.1-55 锻造比与碳化物偏析级别的关系

变形方式的选择主要考虑制件的工况，比如零件的工作部位及其质量要求；原材料质量与尺寸；变形工序对碳化物破碎的状况等。

常用的锻造方法有单向镦粗或单向拔长、轴向反复镦拔、径向十字镦拔、综合锻造法、三向镦拔法等。

单向镦粗或单向拔长：前者用于饼形工件，后者用于轴类工件。对于刃口沿圆周分布的刀体锻造时，镦粗后沿周滚击再平整，以改善锻件周边部分的碳化物分布。

轴向反复镦拔：图 2.1-56 表示了轴向两次反复镦拔的变形过程图。该方法的优点是：操作简单，表层碳化物细小，分布均匀；缺点是：中心部位碳化物偏析改善不大。由于两端面与砧面接触冷却快，易裂纹，所以此法用于表面有刃口的刀体锻件。

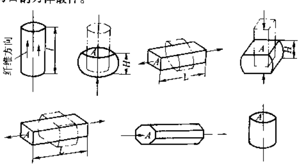


图 2.1-56 轴向反复两次镦拔变形示意图

径向十字镦拔：这种锻造方法为沿横截面中两相互垂直方向进行镦拔，其变形过程如图 2.1-57 所示。可以进行双十字或多十字法镦拔成形。该方法的优点是：坯料中心碳化物容易被击碎；由于坯料与锤头接触面经常更换，端面冷裂倾向减小。缺点是：操作时要求技术熟练。该法适宜于锻制工作部位在中部的制件，如模具等。



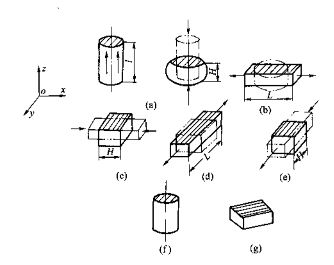


图 2.1-57 径向十字锻造变形过程示意图

综合锻造法：所谓综合锻造法是在径向十字镦拔后转角45°进行倒角，然后再轴向拔长和镦粗，其变形过程如图2.1-58所示。这种方法保留了径向十字锻造镦拔毛坯中心不易开裂和轴向镦拔易于改善碳化物偏析的优点，借助倒角锻造又可使锻件表面碳化物均匀分布，但这种方法操作复杂，不易掌握。

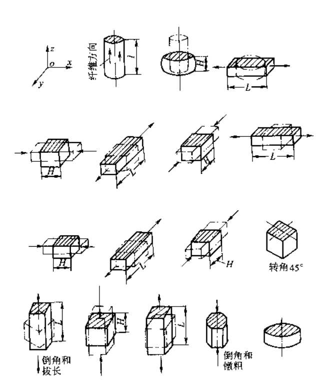


图 2.1-58 综合锻造法变形过程示意图

三向镦拔法：这种方法是沿三坐标轴方向进行镦拔，其变形过程如图2.1-59所示。它综合了径向镦拔与轴向镦拔的优点，能较大程度地打碎钢中碳化物并消除其方向性，从而满足制作模具的需求。锻造Cr12型模具钢时常用这种方法。由于Cr12型钢锻造温度范围较窄，所以每火变形量不能太大。

镦拔次数取决于锻件要求和原材料的情况。在进行轴向反复镦拔时，镦拔次数可参考表2.1-16选用。

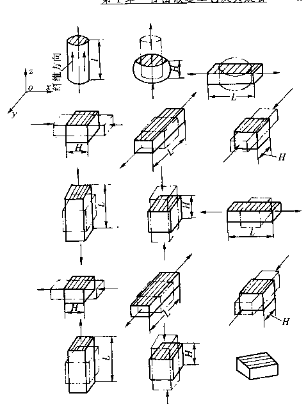


图 2.1-59 三向镦拔变形过程示意图

表 2.1-16 镦拔次数的选用

原材料碳化物均匀性级别	对锻件碳化物均匀性的级别要求			
	3	4	5	6
4	4~3			
5	6~5	4~3		
6		6~5	3~2	
7		7~6	5~4	2~2

锻造操作应注意严格控制锻造温度范围；要求温度均匀，变形均匀；严格执行“轻-重-轻”的操作方法；要勤翻转，避免在一处重复锻击，发现裂纹及时清除；严格控制最后一火的终锻温度并保证有足够的变形量。

3）锻后冷却与退火处理　高速钢锻后对直径或厚度≤80 mm者，一般在热灰中冷却至100℃以下方可取出。对直径或厚度>80 mm者应该炉冷，即将锻件放在720~750℃的保温炉中随炉缓冷至650℃，再放在热灰中冷至100℃以下取出空冷。

Cr12型模具钢锻件，锻后放入石棉灰或干沙中缓慢冷却至100~150℃，然后取出空冷。

莱氏体高合金工具钢锻件，锻后退火的目的是：消除应力，降低硬度，为淬火做好组织准备。高速钢退火温度一般为860~880℃，保温时间2~4 h。等温退火温度为由860~900℃冷至700~750℃，保温时间1.5~2 h。Cr12钢在锻后24 h内必须进行退火，以防开裂破坏。

4.3 不锈钢的锻造

1）不锈钢的分类　按正火后的组织特点，不锈钢分为铁素体型、奥氏体型和马氏体型三种。有些文献将不锈钢分为五类，增加了奥氏体复相不锈钢和沉淀硬化型不锈钢。

2）铁素体不锈钢的锻造特点　铁素体不锈钢加热时晶

粒特别容易长大，而且这类钢不能通过热处理来细化晶粒，所以加热温度不宜过高，一般始锻温度为 1 120 ~ 1 150℃。为了防止粗晶，减少晶间腐蚀和缺口敏感性，终锻温度不允许高于 800℃，但也不低于 700℃。变形量控制在 12% ~ 20%之间。由于间隙元素控制不当，会出现 475℃脆性，因此锻后不宜于在该温度区保温停留，应该快冷，以便快速通过脆性温度区。

3）马氏体不锈钢的锻造特点　马氏体不锈钢加热温度过高时有 δ 铁素体形成，锻造时容易开裂，δ 铁素体一般在 1 100 ~ 1 250℃出现，所以，通常加热温度≤1 150℃为宜。终锻温度随含碳量而异，高碳取 925℃，低碳取 850℃，两者均高于同素异构转变温度（810℃）。

马氏体不锈钢对冷却温度特别敏感。由于锻后空冷会出现马氏体，内应力增大，容易裂纹，所以一般锻后应该缓慢冷至 600℃，然后空冷。

马氏体钢对表面缺陷很敏感，坯料表面上如有划痕等缺陷，锻造中都可能扩展为严重的裂纹。

马氏体钢锻后必须及时退火处理，以消除应力。一般退火温度为 750 ~ 800℃，保温时间为 1 ~ 3 h，并缓冷到 600℃后再空冷。

4）奥氏体钢的锻造特点　奥氏体不锈钢始锻温度一般不超过 1 200℃，因为加热温度过高晶粒粗大。终锻温度不宜过低，否则变形抗力增加。而且 900 ~ 700℃缓冷时有 σ 相析出，形成双相组织，塑性降低，容易开裂。此外，若在 810 ~ 480℃缓冷将有 Cr23C6 沿晶界析出，会大大降低钢的抗蚀性。所以一般在 900℃终锻，然后快冷，以防止上述缺陷发生。

奥氏体不锈钢没有同素异构转变，为了获得细匀的晶粒组织，主要依靠锻造变形，所以除严格控制锻造温度范围以外，最后一火应有足够的锻压变形量。

为了使碳化物能溶解于奥氏体中，锻后应进行固溶化处理。固溶化温度为 1 050 ~ 1 070℃，保温后出炉水冷。

沉淀硬化不锈钢、双相不锈钢变形温度范围窄，塑性差，晶粒易于长大，所以更应严格控制锻造工艺过程。

不锈钢的锻造温度及加热规范列于表 2.1-17。

表 2.1-17　不锈钢的锻造温度及加热规范

钢的牌号	锻造温度/℃		预　热		加　热	
	始锻	终锻	温度/℃	保温时间/min·mm⁻¹	温度/℃ (+20/−10)	保温时间/min·mm⁻¹
0Cr13、1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13	1 150	850	750	0.6 ~ 0.8	1 170	0.3 ~ 0.8
9Cr18	1 100	880	750	0.6 ~ 0.8	1 120	0.3 ~ 0.18
Cr17Ni2	1 150	900	750	0.6 ~ 0.8	1 170	0.3 ~ 0.8
2Cr13Ni2	1 150	900	750	0.6 ~ 0.8	1 170	0.3 ~ 0.8
0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、2Cr18Ni9、Cr23Ni18、1Cr18Ni9Ti	1 160	850	直径大于 100 mm，预热 800℃	0.6 ~ 0.8	1 180	0.5 ~ 1.0
1Cr21Ni5Ti	1 160	850	750	0.6 ~ 0.8	1 180	0.4 ~ 0.8

续表 2.1-17

钢的牌号	锻造温度/℃		预　热		加　热	
	始锻	终锻	温度/℃	保温时间/min·mm⁻¹	温度/℃ (+20/−10)	保温时间/min·mm⁻¹
3Cr13Ni7Si2、2Cr13Ni4Mn9	1 160	900	750	0.6 ~ 0.8	1 180	0.3 ~ 0.8
4Cr14Ni14W2Mo	1 130	900	750	0.6 ~ 0.8	1 150	0.3 ~ 0.8
1Cr11Ni2W2MoV	1 150	900	800	0.6 ~ 0.8	1 170	0.3 ~ 0.8
1Cr12Ni2WMoVNb、2Cr12Ni2W2MoVNb	1 150	900	750	0.6 ~ 0.8	1 170	0.3 ~ 0.8
1Cr19Ni11Si4AlTi	1 160	900	750	0.6 ~ 0.8	1 180	0.3 ~ 0.8
1Cr14Ni3W2V8	1 130	900	750	0.6 ~ 0.8	1 150	0.3 ~ 0.8
2Cr18Ni8W2	1 100	900	750	0.6 ~ 0.8	1 120	0.3 ~ 0.8
Cr18Mn8Ni5	1 100	850	750	0.6 ~ 0.8	1 120	0.3 ~ 0.8
0Cr17Ni4Cu4Nb	1 140	900	750	0.6 ~ 0.8	1 160	0.3 ~ 0.8
0Cr17Ni7Al	1 130	950	750	0.6 ~ 0.8	1 150	0.3 ~ 0.8

4.4　高温合金的锻造

高温合金又称耐热合金，它是现代航空发动机、火箭发动机、燃气轮机及化工设备制造中重要的金属材料，可在 600 ~ 1 100℃的高温下，承受复杂应力和气体腐蚀的环境中工作。目前常用的高温合金主要为铁基和镍基高温合金，其牌号及热变形参数见表 2.1-18。

表 2.1-18　高温合金的锻造温度和加热规范

	合金牌号	锻造温度/℃		预　热		加　热	
		始锻	终锻	温度/℃ ≤	保温时间/min·mm⁻¹	温度/℃	保温时间/min·mm⁻¹
铁基合金	GH13、GH27、GH161、GH2136	1 100	900	750		1 130	
	GH14、GH1015、GH1016、GH1040	1 150	900	750		1 170	
	GH2038、GH138	1 100	900	750		1 130	
	GH2018	1 140	900	750		1 160	
	GH19、GH34	1 150	850	800		1 170	
	GH1035、GH1131、GH1140	1 100	900	750		1 130	
	GH2036	1 180	980	800	0.6 ~ 0.8	1 200	0.4 ~ 0.8
	GH2135	1 120	950	750		1 140	
	GH78	1 100	900	750		1 130	
	GH95、GH2130	1 100	950	750		1 130	
	GH2132、GH2302	1 100	950	750		1 130	
	GH761	1 100	950	750		1 130	
	GH984	1 130	900	750		1 150	
	GH167、GH189、GH901	1 120	950	750		1 140	



续表 2.1-18

合金牌号		锻造温度/℃		预　热		加　热	
		始锻	终锻	温度/℃ ≤	保温时间 /min·mm⁻¹	温度/℃	保温时间 /min·mm⁻¹
镍基合金	GH17、GH3030、GH3039、GH3128	1 160	900	800		1 180	
	GH22、GH333	1 160	950	750		1 180	
	GH32、GH163、GH170	1 120	950	800		1 140	
	GH4033	1 150	980	800		1 170	
	GH4133、GH698	1 160	1 000	800		1 180	
	GH4039、GH4049、GH143、GH220	1 160	1 050	750		1 180	
	GH146	1 150	1 000	750	0.6～0.8	1 170	0.4～0.8
	GH4043、GH3044、GH50、GH151	1 180	1 050	800		1 200	
	GH80、GH141	1 140	1 000	750		1 160	
	GH118、GH710	1 110	1 000	750		1 130	
	GH145	1 160	850	750		1 180	
	GH169	1 120	950	750		1 120	
	GH738	1 150	1 050	750		1 170	

高温合金的性能主要取决于合金化学成分和组织结构。组织结构中重要的是析出相的类型、结构、形状、尺寸、数量与分布等。在铁基和镍基合金中常见的析出相有金属间化合物、碳化物和硼化物。这些化合物可以通过固溶处理、时效处理进行控制和调节，通过塑性变形改善其形貌与分布。

变形高温合金热加工的核心问题是工艺塑性与临界变形的控制，防止产生裂纹和粗晶。

高温合金中由于添加大量的合金元素，枝晶偏析严重，晶界强度下降，加上多相结构，使工艺塑性大大降低。

1）变形温度的确定　为了使高温合金锻件组织中能保留胞状位错网络，获得细匀的晶粒结构，所以锻造变形温度应低于晶粒长大温度。终锻温度应接近（或略高于）第二相质点溶入固溶体的温度和再结晶温度。

高温合金加热时为避免晶粒粗化和合金元素贫化，同时为了减少因导热性差，热膨胀系数大而产生的热应力，应采用分段加热方式，预热温度为 750～800℃，保温时间按 0.6～0.8 min/mm 计算，加热阶段温度为 1 100～1 180℃，保温时间按 0.4～0.8 min/mm 计算。

加热设备可选用电阻炉，以精确控制温度。当选用火焰炉时，应控制燃料中的含硫量（油中含硫量＜0.5%；煤气中 $w_S<0.7$ g/m³），以防渗硫后引起热脆。精锻加热时，应采用少、无氧化加热措施，避免毛坯表面 Cr、Al、Ti 等元素贫化，影响高温合金的疲劳强度和高温持久强度。

2）变形程度的确定　每火变形量应大于临界变形程度，并小于该温度下晶粒长大区相应的变形程度，而且要求变形深透、均匀，防止产生带状粗晶和局部粗晶。高温合金中的粗晶有一定的遗传顽固性，只有通过足够大的后续变形才能消除。为了得到满意的组织性能，在最后一火终锻时，加热温度应较低，变形程度应较大，利用沉淀相来控制组织，改善晶粒大小和晶界状态。

临界变形粗晶直径比正常晶粒要大几个数量级（1～10 mm），为防止粗晶结构，应尽量避开临界变形程度（0.5%～20%）。每种高温合金的临界变形程度随合金牌号和温度而异，例如 GH4049 合金，1 160℃时为 4%～7%，1 180℃ 时为 0.1%～0.3%。GH220 耐热合金在不同温度下的临界变形程度和粗晶状况如表 2.1-19 所示。

表 2.1-19　GH220 合金的临界变形程度

锻造温度/℃ ＼ 项目	最大晶粒直径 /mm	最大晶粒处的变形程度 /%	临界变形区变形程度 /%
1 120	10.0	2.5	1.5～3.4
1 140	9.0	1.8	0.6～4.7
1 160	3.5	3.0	2.0～3.6

防止高温合金中临界变形粗晶的主要途径为控制变形温度与变形程度的合理匹配。当加热温度处于粗晶混晶区间时，锻造变形应加大，例如，GH901 合金原始晶粒度为 1～2 级，在 1 100℃锻造时，欲获得 4～5 级晶粒度，一火变形需控制在 45%～70%之内。此外，改善润滑条件，防止不均匀变形，锻后趁热退火，减少临界变形区畸变能差，也可控制粗晶粒的尺寸。

除了晶粒度以外，晶界状态对组织性能也有重要的影响。晶界缺少沉淀相，容易成为裂纹的通道；晶界上有薄膜状碳化物，会使合金对缺口敏感；晶界上均匀分布有粗大 γ 相和碳化物，对晶界强韧化有益。因此，除了合理的热处理外，在锻造中合理分配变形量，改善晶界状态，获得良好的晶粒与晶界强度的匹配，对提高制件的使用性能，具有重要的意义。

5　有色金属及合金的锻造特点

5.1　铝合金锻造

纯铝的强度仅有 80～100 MPa，因而限制了它在工业中的应用。而在铝中加入 Mn、Mg、Cu、Si、Fe、Ni、Zn 等合金元素，制出各种不同的铝合金，其用途将更为广泛。

铝合金按其成分与工艺的不同可分为铸造铝合金和变形铝合金两大类。变形铝合金按其使用性能和工艺特点不同又分为防锈铝、硬铝、超硬铝、锻铝四类。

1）防锈铝　在防锈铝中主要合金元素是锰和镁，这类铝合金不能时效强化，锻造退火后是单相固溶体，故抗腐蚀性能好。可用来制作油箱、油箱、铆钉等受力不大的抗蚀器件。防锈铝塑性好，易变形，焊接性好，但切削性较差。

2）硬铝　硬铝基本是 Al-Cu-Mg 系合金，还含有少量的 Mn，加入 Cu、Mg 除固溶强化作用外，还形成 $CuAl_2$（θ 相）、Al_2CuMg（s 相）等强化相。Mn 的加入主要是为了改善铝合金的抗腐蚀性，也有一定的固溶强化作用，但 Mn 的析出倾向小，故不参与时效强化过程。各种硬铝都可进行时效强化，合金中的 Cu、Mg 含量越高，时效强化效果越显著，强度越高，塑性与抗腐蚀性则又有所下降。根据铝合金的合金化程度、力学性能和工艺性能，硬铝可分为铆接硬铝（2A01，2A10）、中强硬铝（2A11）、高强硬铝（2A12，2A06）和耐热硬铝（2A02）等。

硬铝广泛应用于航空工业，时效处理后的强度可达 500 MPa，被用于制作飞行器中的承力构件。硬铝的抗腐蚀性差，容易引起晶内腐蚀。

3）超硬铝　超硬铝以 Al-Cu-Mg-Zn 系为主，如 7A04 等，其时效强化相除 θ 相和 s 相外，尚有强化效果很明显的 Mg-Zn2（η 相）及 A12Mg3Zn3（τ 相）。淬火时效处理后的室温强度可超过 600 MPa，是强度最高的一种变形铝合金。这种合金的缺点是抗疲劳性能差，对应力集中敏感，有明显的应力



腐蚀倾向，耐热性也低于硬铝。

4）锻铝　锻铝属于 Al-Mg-Si-Cu 系和 Al-Cu-Mg-Ni-Fe 系合金。该类合金中合金元素虽多，但每种元素的含量都较少，因而具有良好的热塑性，适宜制作各类航空锻件，特别是形状复杂的大锻件。加入 Cu、Mg、Si 等元素，能形成 Mg_2Si、Al_2CuMg、$CuAl_2$ 等化合物，加入 Fe、Ni 时，可提高其使用温度，故又称耐热锻铝合金。常用锻造铝合金有 6A02、2A50、2B50 和 2A14 等。对需要在高温下工作的铝合金，通常加入少量的过渡元素锰、铬、锆、钛，以提高再结晶温度，阻止晶粒长大。

变形铝合金中过多的合金元素含量，会引起工艺塑性和抗腐蚀性严重下降，所以合金中 Cu < 5%，Mg 在 2.5% ~ 5%之间，3% ≤ Zn ≤ 8%，0.5% ≤ Si ≤ 1.2%，Fe、Si 元素是变形铝合金中的有害杂质。

变形铝合金可根据工艺塑性和力学性能分为三类。属于低强度、高塑性的合金有：6A02、3A21、5A02、5A03、5A05 等。属于中等强度和塑性的有：2A14、2B50、2A70、2A80、2A02、2A06、2A11、2A16、2A17、5A06 等。属于高强度低塑性的合金有：2A14、2A12、7A04 等。

铝合金的锻造工艺要点如下。

1）铝合金锻造原材料　铝合金锻造用的原材料有三种形式：铸锭、轧制毛坯和挤压毛坯。选用何种原材料取决于锻件的尺寸、形状、批量及经济效果等因素。然而，大多数铝合金锻件均以挤压毛坯作为原材料。

铸锭用于制作大型锻件。由于铸锭中铸造缺陷比较多，为了得到良好的锻件结构，铝合金铸锭在模锻前要先经自由锻，以预先消除一些铸造组织缺陷。同时铸锭锻造前要经粗加工及均匀化退火处理，以改善塑性。

轧制毛坯具有纤维状的宏观组织。轧制板坯具有比较均匀的组织性能，常用于制作壁板类和大批量生产的小型薄锻件。轧制板坯下料困难，金属损耗大。

挤压毛坯因挤压变形的特点，棒料沿截面晶粒大小和形状不均匀，各向异性大，而外层常有粗晶环、成层、表皮气泡等缺陷，锻造前应该清除。

大型重要锻件和模锻件最好采用轧制棒材，其次是挤制棒材，最后是锻制棒材。

铝合金下料多用锯切、车切等切削加工方法，剪切应用较少，个别情况下采用锤上热剁。

2）锻前加热及锻造温度　加热铝合金毛坯一般采用电阻炉，最好能自动控温，控制气氛与强制循环。若用火焰炉加热，必须使用低硫燃料，以防渗硫。不许火焰直对坯料，以防局部过烧。

装炉前毛坯要去除油污，不能与钢毛坯同炉加热，以防铝屑与氧化铁皮混在一起发生爆炸。铝合金导热性好，可以高温装炉，快速加热。加热时间按毛坯直径或厚度以 1.5 min/mm 计算。毛坯加热到始锻温度后，是否需要保温，以锻造时不出现裂纹为准。铸锭加热必须保温。

表 2.1-20 列出了常用铝合金的锻造温度范围。表中数据说明铝合金的锻造温度范围很窄，应该谨慎操作。锤上锻造时因热效应升温，所以锻造温度比在压力机上锻造低 20 ~ 30℃。

3）锻压成形　变形速度对工艺塑性的影响，主要取决于合金加工硬化与再结晶软化速度之间的关系。研究表明，大多数铝合金随着变形速度的增大，工艺塑性并无显著的下降；只有个别高合金化铝合金在高速变形时，塑性才明显降低。在锻压温度范围内变形速度对变形抗力的影响比较明显，例如，当合金由压力机改为锤上锻造时，变形抗力随着合金化程度不同，大约增加 0.5 ~ 2 倍，所以，为了增大铝合金在锻造时允许的变形程度，提高生产率，减小变形抗力，

表 2.1-20　铝合金锻造温度和加热规范

合金种类	合金牌号	锻造温度/℃ 始锻	锻造温度/℃ 终锻	加热温度/℃ (+10/−20)	保温时间/min·mm⁻¹
锻铝	6A02	480	380	480	1.5
	2A50,2B50,2A70,2A80,2A90	470	360	470	
	2A14	460	360	460	
硬铝	2A01,2A11,2A16,2A17	470	360	470	
	2A02，2A12	460	360	460	
超硬铝	7A04，7A09	450	380	450	3.0
防锈铝	5A03	470	380	470	1.5
	5A02，3A21	470	360	470	
	5A06	470	400	400	

改善合金充填模腔的流动性，选用压力机锻铝合金比锤要有利一些，对大型铝合金模锻件尤其如此。

铝合金的临界变形程度为 12% ~ 15%。为避免形成粗晶，终锻温度下的变形程度应避开临界变形程度。铝合金锻造最容易产生粗晶，除考虑临界变形因素外，变形分布不均匀，终锻温度低，淬火温度高，保温时间长等也会导致粗晶。

选择合理的变形程度，可以保证铝合金在锻造过程中不开裂，并获得良好的组织性能。表 2.1-21 列出了铝合金每次塑性变形时允许的变形程度。

表 2.1-21　铝合金允许的变形程度

合金组	水压机	锻锤、热模锻曲柄压力机	高速锤	挤　锻
	镦　粗			
低强度和2A50合金	80% ~ 85%	80% ~ 85%	80% ~ 90%对 5A05 合金 40% ~ 50%	90%和90%以上
中强度	70%	50% ~ 60%	85% ~ 90%，对 5A06 合金 40% ~ 50%	
高强度	70%	50% ~ 60%	85% ~ 90%	
粉末合金	30% ~ 50%	50% ~ 60%	—	80%以上

4）锻造工艺与模具设计要点

① 分模位置。分模面的选择关系到锻件精度与内部流线走向。合理的分模位置应该出模容易，尽可能平直分模，以方便检查错模，此外应使锻件内流线完整并且与外形一致，不产生涡流、折叠与切边后流线末端外露现象。

② 加工余量与锻造公差。铝合金锻造时表面氧化、污染以及金相组织变化不明显，所以加工余量较小。但常因锻不足和模具磨损，所以正公差较大。

③ 铝合金模锻件斜度通常采用 7°，有顶出装置者也可用 1° ~ 5°，这是铝合金的黏附力大，不易出模之故。模锻圆角半径比钢锻件要大。

④ 铝合金不宜采用滚压和拔长模膛制坯，因为反复变形流动时，容易产生内裂。

⑤ 模锻时，要预热模具（预热温度 250 ~ 400℃），模膛要仔细抛光，以利于变形流动。锻造时应先轻击，然后重击，打碎粗晶粒，充满模膛。

⑥ 切边、冷却和热处理。除超硬铝外，铝合金锻件都

用冷切边。大型模锻件也可用带锯切边。

对于合金化程度较高的铝合金，模锻后若长时间不切边，则可能因时效析出的强化相，引起切边撕裂。

铝合金锻后一般在空气中冷却，也可水冷。

铝合金锻件主要采用高温退火（又称再结晶退火）和完全退火，如表 2.1-22 和表 2.1-23 所列。

表 2.1-22 铝合金锻件再结晶退火制度

合金牌号	退火温度/℃	冷却剂
1 060 ~ 8A06	350 ~ 410	空气或水
5A02	350 ~ 410	空气或水
5A03	350 ~ 410	空气或水
5A05	310 ~ 350	空气或水
5A06	310 ~ 350	空气或水
5B05	350 ~ 410	空气或水
3A21	350 ~ 410	空气或水
2A02	350 ~ 370	空气或水
2A11	350 ~ 370	空气
2A12	350 ~ 370	空气
6A02	350 ~ 370	空气
2A50	350 ~ 460	空气
2B50	350 ~ 460	空气
2A70	410 ~ 430	空气
2A80	350 ~ 460	空气
2A90	350 ~ 460	空气
2A14	350 ~ 460	空气

表 2.1-23 铝合金锻件完全退火制度

合金牌号	退火温度/℃	冷却方法
2A11	390 ~ 430	炉冷
2A12	390 ~ 430	炉冷
2A50	380 ~ 450	炉冷
2A70	380 ~ 450	炉冷
2A14	350 ~ 400	炉冷
7A04	390 ~ 430	炉冷
LC5	390 ~ 430	炉冷

5.2 镁合金锻造

镁合金按其化学成分和工艺特点可分为铸造镁合金和变形镁合金两大类。变形镁合金主要有 Mg-Mn 系、Mg-Al-Zn 系、Mg-Zn-Zr 系、Mg-Mn-Ce 系四类，见表 2.1-24。

表 2.1-24 镁合金的成分及分类

组别	牌号	系列	基本成分（质量分数）/%						杂质不大于（质量分数）/%								应用	塑性
			铝	锰	锌	铈	锆	镁	铝	铜	镍	锌	硅	铍	铁	其他		
I	MB1	Mg-Mn		1.3 ~2.5					0.3	0.05	0.01	0.3	0.15	0.02	0.05	0.2	焊接结构板材、棒材、模锻件、低强度构件	高
I	MB8	Mg-Mn		1.5 ~2.5		0.15 ~0.35			0.3	0.05	0.01	0.3	0.15	0.02	0.05	0.3	板材、模锻件、型材、管材	高
II	MB2	Mg-Al-Zn	3.0 ~4.0	0.15 ~0.5	0.2 ~0.8					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	形状复杂的锻件、模锻件	中
II	MB3	Mg-Al-Zn	3.5 ~4.5	0.3 ~0.6	0.8 ~1.4					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	板材、模锻件	中
II	MB5	Mg-Al-Zn	5.5 ~7.0	0.15 ~0.5	0.5 ~1.5			余量		0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	条材、棒材、锻件、模锻件	中下
II	MB6	Mg-Al-Zn	5.0 ~7.0	0.20 ~0.5	2.0 ~3.0					0.05	0.005		0.15	0.02	0.05	0.3	棒材	中
II	MB7	Mg-Al-Zn	7.0 ~9.2	0.15 ~0.5	0.22 ~0.8					0.05	0.005	0	0.15	0.02	0.05	0.3	棒材、锻件、模锻件、高强度构件	低
III	MB15	Mg-Zn-Zr			5.0 ~6.0		0.32 ~0.9			0.05	0.005	锰 0.1	0.05	0.02	0.05	0.3	棒材、型材、条材、锻件、模锻件、高强度构件	中
IV	MB14	Mg-Mn-Cr		1.4 ~2.2		2.5 ~3.5					0.01	0.2	0.2	0.01			棒材、模锻件、200℃以下工作的耐热镁合金	中

镁合金的强度高，具有良好的抗震性及切削加工性。但是它易燃烧、易腐蚀，高温长时间保温会软化，对缺口敏感性高。除 Mg-Mn 合金外，塑性和流动性差，且对锻造温度、变形速度、变形程度等热力因素的改变比较敏感，因此镁合金比铝合金锻造困难。

1）镁合金锻造原材料　镁合金锻造用的原材料主要有铸锭和挤压毛坯两类。绝大多数情况下采用挤压毛坯，仅在锻制大型模锻件时才用铸锭。铸锭在锻造前对其表面进行粗加工，并作高温均匀化处理，以改善其塑性。若对挤压前铸锭进行高温均匀化处理，可增大挤压变形程度。挤压毛坯的塑性好，但有力学性能的异向性，可以通过镦拔变形来减小各向异性。

2）锻前加热及锻造温度　镁合金导热性良好，可以直接高温装炉快速加热。但是，镁合金原子扩散速度慢，强化相溶解要较长时间，为得到均匀组织，保持良好的塑性状态，一般加热时间稍长。通常镁合金的加热时间，对直径小于 500 mm 的毛坯，按 1.5 min/mm 计算，对直径（或厚度）在 50 ~ 100 mm 的毛坯，按 2.5 min/mm 计算。坯料的加热温度和保温时间必须严加控制（表 2.1-25），因为超过一定温度或保温时间太长会发生软化、晶粒长大、力学性能降低等现象，所以镁合金总加热时间一般不超过 6 h。

表 2.1-25　镁合金加热时允许的保温时间

合金	温度/℃	保温时间/h	温度/℃	保温时间/min·mm⁻¹
MB5	400	5	450	8
MB8	400	4	420	2
MB14	400	3	420	2
MB15	400	6	450	3

由于镁合金的工艺塑性、变形抗力对变形温度、变形速度及应力状态等十分敏感，所以加热锻造时应严格控制热力因素。常见镁合金的变形温度范围和允许的变形程度见表 2.1-26。

表 2.1-26　镁合金锻造温度范围与允许变形程度

合金	锻造温度/℃		允许变形程度/%		合金的塑性
	锤上	压力机上	锤上	压力机上	
MB1	320 ~ 500	320 ~ 500	80 ~ 85	85 ~ 90	高
MB8	350 ~ 480	350 ~ 480	70	70 ~ 80	高
MB2	350 ~ 425	350 ~ 450	30	80	中
MB5	325 ~ 375	350 ~ 380	20 ~ 30	60	中下
MB7	不宜锤上锻	320 ~ 380	—	25 ~ 30	低
MB11	300 ~ 350	300 ~ 375	25 ~ 30	50 ~ 60	低
MB14	390 ~ 450	390 ~ 480	50 ~ 70	80	中
MB15	320 ~ 410	280 ~ 400	30 ~ 40	90	中

3）锻造成形

① 变形速度与变形程度。镁合金对变形速度十分敏感，大多数镁合金在锤上变形时，允许变形程度不超过 30% ~ 50%，而在液压机上变形时，塑性增加，变形程度可达 70% ~ 90%。合金化程度低的 Mg-Mn 系 MB1 和 MB8 合金，塑性良好，便于锻造成形。而含锌的镁合金塑形低，应在有利变形的应力-应变状态下加工成形。

② 锻压工艺。由于镁合金在高温下具有较大的摩擦因数，黏附力大，流动性差，工艺塑性低，所以工艺参数与模具设计与铝合金相似或较大。锻造时应保持较好的应力-应变状态，一般采用单槽模锻。工模具预热温度一般为 250 ~ 420℃，同样应采用先轻后重的操作方法。

③ 切边、精压和冷却。镁合金大型模锻件的毛边通常用带锯切和铣切，也可在 200 ~ 300℃时用咬合式模具，小间隙或无间隙方法切边。但应注意防止镁合金锻件切边裂纹缺陷。

锻件精压通常在模锻温度范围内进行，也可在 230 ~ 250℃时，进行半热精压，平均变形程度为 10% ~ 15%。由于半热精压时的加工硬化，使制件的力学性能与尺寸精度有所提高。

镁合金锻后在空气或水中冷却，直接水冷可防止晶粒长大。对于时效强化镁合金，水冷获得过饱和固溶体组织，在最后时效处理过程中，有利于沉淀析出。

④ 清理和热处理。镁合金易于氧化锈蚀，所以要及时做表面除油、酸洗、氧化处理。

除油后，用 50 ~ 60℃的热水洗涤 0.5 ~ 2 min，再用流动冷水冲净。然后酸洗表面，显露表面的折迭、裂纹、拉伤等缺陷，并修理清除。之后氧化处理（氧化液的配方如表 2.1-27）并清洗吹干。最后采用塑料包装。

表 2.1-27　镁合金氧化处理溶液配方及工艺条件

编号	溶液成分	含量/g·L⁻¹	温度/℃	时间/min	膜层颜色
1	重铬酸钾 $K_2Cr_2O_7$ 硝酸 HNO_3（相对密度 1.42） 氯化铵 NH_4Cl（允许用食盐代）	40 ~ 55 90 ~ 120 0.75 ~ 1.25	70 ~ 80	0.5 ~ 2.0	草黄色到棕色
2	重铬酸钾 $K_2Cr_2O_7$ 铝钾矾 $K_2Al_2(SO_4)_4 \cdot 24H_2O$ 醋酸（60%）	30 ~ 50 8 ~ 12 5 ~ 8	15 ~ 30	3 ~ 15	金黄色到棕褐色

注：1. 槽液成分应每季度分析一次，根据分析结果及时调整比例。
2. 工序之间的氧化处理以 1 号溶液为宜。

镁合金主要的热处理方式有软化退火及淬火、时效等。不能热处理强化的镁合金 MB1、MB8 和热处理强化作用不大的 MB2、MB3、MB5，只用软化退火。可以热处理强化的 MB7、MB15 通常要进行淬火、时效处理。

5.3　铜合金锻造

在铜中加入锌、锡、铅、镍、锰、硅和铝、铍、铁、铬等元素，形成铜合金。常用铜合金有黄铜（铜锌合金）、青铜（以锡或铅、硅、铍等作为主要的添加元素）、白铜（铜镍合金等）。

1）铜合金锻造原材料　铜合金锻造原材料主要有铸锭和挤压棒材两种。

铸锭用作大锻件，锻前要进行均匀化退火，以改善塑性。铸锭若有表面缺陷，应清除干净或者进行表面粗加工，以防止锻造后形成废次品。

挤压棒料适用于中小锻件，为清除挤压棒料内部的残余应力，要求及时进行退火，以防裂纹产生。

铜合金多用圆盘锯下料，也可车床下料。

2）锻前加热与锻造温度范围　铜合金最好采用调节、控制温度方便的电炉加热。也可以用火焰炉加热，但要注意保持燃烧稳定，及时调控炉内气氛。加热炉内气氛最好呈中



性，至少应是微氧化或微还原气氛。对于高温易氧化的铜合金，如无氧铜、低锌黄铜、铝青铜、锡青铜、白铜等，一般在还原气氛中加热。对于含氧量高的铜合金，则不适宜在还原气氛中加热。因为还原气氛中有 H_2、CO、CH_4 等气体，当加热温度超过 700℃时，这些气体会向金属内部扩散，生成不溶于铜的 H_2O 或 CO_2，这些气体力图从铜中逸出，结果在金属内部形成微小裂纹，使铜合金变脆，即所谓"氢病"。加热纯铜时，最好为微氧化性气氛，这样既可避免"氢病"，又可减少氧化皮生成。高锌黄铜在微氧化气氛中加热，既可防止脱氧，又能防止严重氧化。

铜合金导热性好，可以高温装炉，快速加热。在火焰炉内加热时，炉温比始锻温度高 50～100℃，在电炉内加热时可高 30～50℃。加热时间如表 2.1-28 所示。

表 2.1-28　铜合金的加热时间

合　金　牌　号	加热时间 /min·mm^{-1}
T1，T2，T3，T4，H96，H90，H85，H80，HSn90-1，QCr0.5，QSi1-3，QCd1	0.4
H70，H68，H62，HAl77-2，HAl60-1-1，HAl59-3-2，HPb59-1，HPb61-1，HSn90-1，HSn62-1，HSn60-1，HMn58-2，HFe59-1-1，QSn4-3，QSn4-0.3，QAl5，QAl7，QMn5，QBe2	0.6
HNi65-5，HSi80-3，H59，QSn7-0.2，QSn6.5-0.4，QSn6.5-0.1，QAl9-2，QAl9-4，QAl10-3-1.5，QAl10-4-4，QSi3-1	0.7

注：1. 加热时间从合金加热到始锻温度后开始计算。
2. 表中数据为第一火加热所需时间，以后各火则为第一火加热时间的一半。
3. 炉温应比合金始锻温度高 30～100℃。

铜合金的锻造温度范围如表 2.1-29，因为不少铜合金在终锻温度以下会很快进入脆性区（中温脆性区 600～500℃），

表 2.1-29　铜合金的锻造温度范围

合金种类	合　金　牌　号	锻造温度/℃ 始锻	锻造温度/℃ 终锻	加热温度/℃ $\left(\begin{smallmatrix}+10\\-20\end{smallmatrix}\right)$	保温时间 /min·mm^{-1}
黄铜	HPb59-1	720	650	720	0.6
	HPb61-1	810	650	810	
	H62，H68	810	650	810	
	H70	840	700	840	
	H80	860	700	860	
	H90	890	700	890	
	H96	920	750	920	
青铜	QAl9-2，QAl9-4	890	700	890	0.7
	QAl10-3-1.5	840	700	840	
	QAl10-4-4	890	750	890	
	QBe2.5	740	650	740	0.6
	QSi1-3	870	700	700	0.7
	QSi3-1	790	700	630	
	QCd1.0，QMn5	840	650	650	0.6
	QSn6.5-0.4，QSn7-0.2	790	700	700	0.7
纯铜	T1，T2，T3，T4，T5	900	650	900	0.6
白铜	B19	1 000	850	1 000	

所以在 650℃左右，应立即停止锻造，否则将发生锻造开裂。在冲孔时，冲头周边因接触温降而形成裂纹。模锻件在脆性区切边，断口会呈粗晶撕裂状。所以，应控制中温脆性。但是，终锻温度也不可过高，否则又会引起晶粒急剧长大，且铜合金晶粒长大后又不能采用热处理细化。因此，应严格控制铜合金的锻压温度范围。

3）锻造成形　由于多数铜合金有中温脆性区存在，所以，应严格控制热力参数。一方面锻造操作时动作要快。另一方面要预热工模具（200～300℃），防止接触散热损失。

为避免粗大晶粒，要求铜合金锻造时，每次变形量大于临界变形量（10%～15%）。

多数铜合金对变形速度并不敏感，可在压力机上锻造，也可在锤上锻造成形。但铅黄铜对变形速度敏感，要求在压力机上锻造。锡、磷青铜和锰青铜锻造时，热效应比较明显，如果变形速度过快，容易产生过热与过烧。所以，铜合金以压力机锻造为宜。

铜合金锻件设计与锻模设计原则与钢锻件相同。但铜合金摩擦因数较小，故模锻斜度较小。因锻压温度范围窄，宜用单槽模锻。

铜合金非常适宜挤压成形，航空发动机上有许多铜合金附件，都是采用挤压成形。

由于铜合金对内应力比较敏感，若不及时消除容易引起开裂破坏，因此，要求锻件各处的温度分布和变形分布应该均匀，以减少附加应力，使性能一致。

铜合金锻造时易形成折迭，所以模锻前制坯工序的圆角半径要做得比钢锻件大一些，另外，加工余量也要比钢锻件大一些。

4）切边和清理　铜合金锻后一般在室温下切边。但对于 QAl9、QAl10-4-4 等铝青铜锻件，因其在室温下塑性低、强度高，冷切边会发生撕裂缺陷，需用热切。热切边温度为 420℃左右。大型铜锻件也应热切边。

铜合金锻件的清理主要采用酸洗，小型锻件有时也采用吹砂清理。锻件酸洗工艺如表 2.1-30 所列。

含硅高的铜合金锻件，表面可能生成氧化硅，这要用氢氟酸才能去除。

含镍高的铜合金锻件，最好在控制气氛中加热，以减少氧化皮的生成。

5）冷却和热处理　铜合金锻件通常在空气中冷却。黄铜锻件热处理方式有低温去应力退火和再结晶退火两种。

低温去应力退火主要用于冷变形制品，其目的是为了消除工作内应力，防止变形和应力腐蚀。低温退火是在 260～300℃，保温 1～2 h，然后空冷。

再结晶退火是为了消除加工硬化，得到较为均匀的组织。黄铜的再结晶温度约在 300～400℃，常用的退火温度为 600～700℃。α 黄铜因退火中不发生相变，可以在空气中或水中冷却，对合金性能影响不大。α＋β 黄铜，退火加热时发生 α→β 相变，冷却时又发生 β→α 相变，冷速愈快析出的 α 相愈细，硬度会有提高，冷速缓慢则合金塑性良好。

青铜锻后热处理方式也是退火。但对于铍青铜，硅镍青铜等合金可用热处理强化（淬火、时效），一般不进行退火处理。

5.4　钛合金锻造

钛及其合金与其他金属结构材料比较具有三个显著的特点：密度小、强度高，因而比强度高；中温性能好；耐热和耐腐蚀性好。在室温下，钛合金的比拉伸强度为高强钢的 1.26 倍，为高强铝合金的 1.38 倍。在 400～550℃温度范围内，钛合金的比持久强度、比蠕变强度和比疲劳强度，都明显地优于耐热不锈钢。因此，钛及其合金在航空、航天、造船和化工等行业得到广泛的应用。

表 2.1-30 铜合金锻件酸洗工艺

酸洗工序	溶液成分	溶液温度/℃	浸蚀时间/min	附 注
除油	NaOH 或 KOH 相对密度 3.2 或 2.12，纯度≥95%或 88%，浓度 50～70 g/L	60～80	一般为 3～5，具体的停留时间要根据锻件表面油污程度而定	锻件表面若无油污，可不必进行除油处理
洗涤	水洗	室温流水 热水 50～60	1～2	
酸洗	HNO_3 相对密度 1.53，纯度≥96% 含量 200～300 g/L[①]	室温	1～3	浸洗时间长短要根据锻件表面实际情况而定
	体积分数为 4%～15%的 H_2SO_4 + 余量 H_2O； 体积分数为 40%～90%的 HCl + 余量 H_2O[②]	20～60 20	0.5～5 1～2	去除氧化皮
	10%的 NaOH + 余量 H_2O（体积分数） 水洗 重复	室温 室温	2～6	消除铝青铜锻件表层的氧化膜
洗涤	水洗	室温	洗涤时间自定	洗净锻件表面上的残液
光泽处理	铬酐（CrO_3）30～50 g/L（相对密度 2.7），纯度≥98% 硫酸 2～3 g/L（密度 1.84，纯度≥92%）	室温	一般为 2～5 s，按实际情况而定	
洗涤	热水漂洗	60～80	3～5	
干燥	用干燥的压缩空气吹干			
检验	锻件表面应洁净有光泽，不应有过腐蚀，但允许有黑色斑点存在			

① 适用于一般铜合金锻件的酸洗。

② 适用于铜及黄铜锻件的酸洗。

我国变形钛合金的表示方法为：TA 系列代表 α 型钛合金，TB 系列代表 β 型钛合金，TC 代表 α+β 型钛合金。按照钛合金在平衡和亚稳定状态的相组成来划分，还有近 α 型和近 β 型钛合金。

钛在 882.5℃发生同素异构转变。在 882.5℃以下为密排六方晶格，称为 α-Ti，强度高，塑性低，变形加工比较困难。在 882.5℃以上，为体心立方晶格，称为 β-Ti，塑性高，易于变形加工。

α 钛合金除了工业纯钛外，多数属于 Ti-Al 系。α 钛合金为单相组织，不能热处理强化。β 钛合金中加入 β 稳定化学元素，使 β 转变温度降到室温，其退火组织完全为 β 相。真正稳定的钛合金，贵重元素加入量多，性能又不理想，实用意义不大。亚稳定的 β 合金 TB1 和 TB2 可以热处理强化，有一定的应用价值。α+β 钛合金兼有 α 和 β 钛合金优点，可以热处理强化，具有优良的耐热性和加工塑性，用途颇为广泛。

1）钛合金的微观组织及其对力学性能的影响　钛合金的显微组织有三种：

① 等轴组织。当加热温度低于 β 转变温度，且变形程度足够大，在等轴 α 相基体上分布一定数量的小岛状 β 相或 β 转变组织。这种组织综合力学性能好，尤其是冲击韧性与塑性较好。

② 网篮状组织。变形温度高于 β 转变温度，变形程度足够大，在 α+β 两相区终锻，β 晶界遭到一定程度的破碎，轮廓不太完整、清晰，条状 α 相不同程度地发生歪曲，其间分布着 α 和 β 的混合体。这种组织的塑性、冲击韧性较魏氏组织好，高温持久强度和蠕变性能也比较好。

③ 魏氏组织。合金加热到 β 转变温度以上，变形程度较小。晶粒粗大，β 晶界完整，晶内片状 α 相按一定位向排列。这种组织冲击韧性差，塑性低，不过蠕变抗力较高。

2）钛合金的工艺塑性　钛合金中的碳、合金元素、气体杂质，尤其是氧对钛合金的塑性有很大的影响。

铸态钛合金经预变形后，塑性大为提高。

低温下，六方晶格组织塑性差，随温度升高转为体心立方晶格组织，塑性大为提高。因此，钛合金一般在热态下塑性加工。

应变速率对钛合金塑性有很大的影响。对铸态 TA3 镦粗实验表明，锤上镦粗（其速度约为 6～9 m/s）允许变形程度不大于 45%，而在液压机上镦粗（速度为 0.003 m/s）允许变形程度可达 60%。

3）钛合金的温度规范　α 和 α+β 钛合金铸锭开坯，因其后续还有塑性变形和热处理工序，故其加热温度可取在 β 相区，而终锻温度取在 α+β 相区。

通常钛合金锻造加热温度一般在 β 转变温度附近。钛合金的锻造温度和加热规范如表 2.1-31。

表 2.1-31 钛合金的锻造温度和加热规范

合金种类	合金牌号	β转变温度/℃	预先经过变形的毛坯 始锻温度/℃	预先经过变形的毛坯 终锻温度/℃	预先经过变形的毛坯 保温时间/min·mm⁻¹	钛铸锭 始锻温度/℃	钛铸锭 终锻温度/℃
α钛合金	TA2 TA3		900 (870)	700 (650)	0.8	980 1 050	750 850
	TA4		980 (980)	800 (800)			
	TA5		980 (980)	800 (800)		1 050	850
	TA6 TA7	1 025～1 050	1 020 (990)	900 (850)		1 150	900
	TA8	950～990	960 (940)	850 (800)		1 150	900



续表 2.1-31

合金种类	合金牌号	β转变温度/℃	预先经过变形的毛坯			钛铸锭	
			始锻温度/℃	终锻温度/℃	保温时间/min·mm⁻¹	始锻温度/℃	终锻温度/℃
β钛合金	TB1	750~800	930 (920)	800 (700)	0.7	·	
α+β钛合金	TC1	910~930	910 (900)	750 (700)	0.7	980	750
	TC3	920~960	920 (900)	800 (750)	0.7	1 050	850
	TC4	960~1 000	960 (940)	800 (750)	0.8	1 150	850
	TC5 TC6	950~980	950 (950)	800 (800)		1 150	750
	TC8	970~1 000	970 (960)	850 (800)		1 150	900
	TC9 TC11	970~1 000	970 (960)	850 (800)		1 150	900
	TC10	950~960	930 (910)	850 (800)		1 150	900

注：表中括号内数据为压力机和平锻机选用的温度；无括号数据为锻锤选用的温度。

4）变形温度对钛合金性能的影响　锻造温度对α+β钛合金室温性能及β晶粒尺寸的影响情况可由图2.1-60说明，由图可知，当锻造温度超过合金β转变温度，发生晶粒粗大、塑性下降的现象，称为β脆性。因此对于α+β合金，为了避免β脆性，应在其β转变温度以下锻造。并且使钛合金锻后含有20%~30%初生等轴α相，从而具有良好的综合性能。

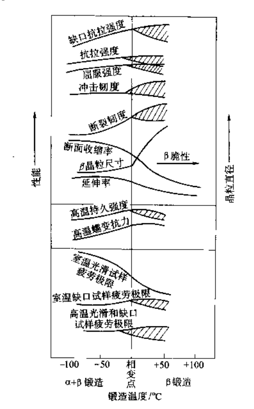


图 2.1-60　变形温度对（α+β）钛合金组织性能的影响

锻造温度对α钛合金的室温性能和晶粒尺寸的影响，如图2.1-61所示。由图可知，为了避免β脆性，也应在β转变温度以下进行锻造。这两种合金的始锻温度以其在β转变温度以下14~28℃为宜。但是，由于α合金较α+β合金对组织的敏感性小，即在β转变温度以上锻造引起的β脆性倾向小，所以，其变形温度可稍高于β转变温度而不带来较大的危险。

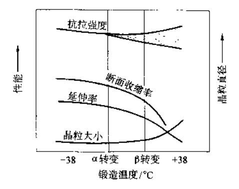


图 2.1-61　变形温度对α钛合金组织性能的影响

β钛合金，加热也发生同素异构转变，也有β脆性倾向，但是该合金β转变温度低，晶粒长大倾向不明显。因而β钛合金的始锻温度可高于β转变温度，但也不能过高。β钛合金为了得到良好的强度和塑性的配合，应在稍低于再结晶温度锻造。以防α相沿晶界析出，使塑性、韧性下降。钛合金随着温度的下降，变形抗力急剧上升，塑性急剧下降，所以钛合金终锻温度不宜过低。

5）变形程度和变形速度　钛合金锻造时，为了减少各向异性，必须要有足够的变形程度。当变形程度大于30%~40%时组织开始明显细化。在α+β相区锻造，要使针状粗晶粒转变为球状细晶，变形程度不得小于60%~70%。

变形程度在2%~10%范围内，晶粒非常粗大。而后变形愈大，晶粒愈细。但变形程度超过85%以后，由于发生聚集再结晶，合金的晶粒反而粗大，因此，合金锻造时应避开上述临界值。

变形速度对钛合金锻件质量没有明显的影响，在锤上锻造和在压力机上锻造，组织性能比较接近。但是钛合金在压力机上锻造比较适宜。因为在压力机上锻造，变形速度比较慢，再结晶软化能充分进行、变形抗力小、塑性高。而在锤上锻造时，热效应大、过热危险性大、晶粒粗大、塑性降低，不利于锻造成形和改善组织性能。例如，TC6钛合金在940~950℃锻造时，当变形程度为20%~30%，因热效应引起的温升为10~20℃，当变形程度为50%~60%时，温升为40~60℃，而变形程度增达到80%~90%时，热效应引起的温升达100~140℃。在锤上模锻时，因热效应引起的局部温升超过转变温度，导致局部粗晶和性能下降。对成形过程和锻件质量都有不良的影响。

6）锻件和模具设计特点　钛合金的收缩率比钢小，在0.5%~0.7%之内。

钛合金充填型槽能力不如合金钢和铝合金，因此，锻件内、外圆角半径比较大。毛边槽桥部尺寸较大。型槽表面应光洁，壁厚比钢锻模大50%。

钛合金模锻后一般在600~800℃时热切边，切边模间隙为0.1~0.5 mm。

7）锻后冷却与热处理　钛合金锻后一般采用空冷。但对合金化程度较低的钛合金，在β相区锻后可水淬快冷，其塑性指标和其他力学性能比空冷加退火的要高。锻后快冷提高性能的原因是β晶粒减小，针状α相位间差增大，β晶界



上条状α相消失。另外为显现快冷效果，冷却速度必须调控在一定范围之内，过快冷却，β相再结晶受阻，粗晶会保留。α相针状尺寸小于最优尺寸，塑性指标反而下降。对合金化程度较高的钛合金，要求锻后缓冷，以便其达到平衡状态，并使α细针加粗到最优尺寸，以提高力学性能。

钛合金的热处理主要有消除应力的退火。稳定粗织性能的等温退火，双重退火。淬火时效的强化热处理等。

8）清理　钛合金在热变型中，很容易与氧、氮、碳氢化合。使表层硬脆，表面氧化皮，深度达 0.15～0.24 mm，硬度达 60～59HRC，且很难清除。

氧化皮须预先在加有硝酸钠或亚硝酸钠的氢氧化钠的溶液中处理。或用喷丸、喷砂等机械方法清除。而后在酸液中酸洗（见表 2.1-32）以便显现缺陷，便于清理。

表 2.1-32　酸洗溶液

溶液成分/%	酸洗温度/℃	浸蚀时间/min
H_2SO_4 110～130 g/L + HF70～80 g/L	20	0.5～5
H_2SO_4 180～220 g/L + HF35～45 g/L	55～65	10～30

对表面残存的玻璃润滑层，可用酸或碱腐蚀掉。例如，在熔融的氢氧化钠中（460～460℃）加人 20%的智利硝石，腐蚀 25～35 min，然后在 100℃的热水中清洗，可去除玻璃润滑层。

化学法清理表面污染很费事，但能显示表面缺陷。用喷丸、喷砂等机械方法清理，但不能清楚地呈现表面缺陷。因此，在加热和锻压过程中防止污染与增氧问题应该予以重视。

6　锻件锻后的冷却和热处理

6.1　锻件的冷却

锻件的冷却方式是根据材料的化学成分、散热截面的尺寸，锻件技术要求并考虑白点敏感性、内应力裂纹、网状碳化物等影响因素而选定的。

常用冷却方法有以下几种。

1）空冷　将锻件放在静止空气中冷却的方法。对小锻件或要求快速冷却者，也可用吹风冷却或喷雾冷却。

2）坑冷　将锻件放在地坑里或铁箱中冷却的方法。

3）灰砂冷　将锻件放在炉渣、石灰或干砂中冷却的方法。所用灰砂必须干燥。锻件埋入灰砂的温度不低于 500℃，埋砂厚度不低于 80 mm。

4）炉冷　锻件（入炉温度不低于 600～500℃）放入加热炉中（炉温为 500～700℃）按预定的规范调控冷却速度，随炉冷却到 100～150℃后出炉空冷。

碳钢和低合金结构钢，导热性好，冷却速度可快些。大锻件散热困难，内外温度差大，冷速应慢些。

6.2　锻件的热处理

锻件热处理不同于零件热处理，锻件热处理叫第一热处理或预备热处理，主要作用是稳定尺寸调整硬度，便于机械加工。消除应力，扩散氮氧。防止白点和裂纹缺陷。改善微观组织结构为第二热处理做好组织准备。

1）中小锻件热处理方式有退火、正火、调质等一般热处理方式以及余热处理，固溶处理及时效处理等专用热处理形式。

大锻件热处理主要有防止白点处理和正火回火处理等。

2）工具钢锻件的热处理。工具钢锻后一般具有片状珠光体组织，为改善切削加工性和最终热处理性能，要进行球化退火。如果锻造组织为过热的粗大组织或有网状碳化物，要先正火，然后再进行球化退火。由于正火温度较高，需注意防止表面严重脱碳。

工具钢锻件球化退火的保温时间，根据钢的化学成分，锻件的形状尺寸和装炉量而定，通常为 1～4 h。钢料合金元素多、有效厚度大，装炉量多的保温时间取上限，反之取下限。冷却速度按钢中合金元素含量确定。一般为 22～28℃/h，合金元素多者取下限，碳素工具钢取上限。控制冷却至 500～600℃后，出炉空冷。

工具钢锻件的等温退火规范，按锻件有效厚度、化学成分、装炉量及炉子类型而定。退火加热温度下的保温时间，一般为 2～4 h。自退火加热温度到等温温度的冷却速度约为 40～50℃/h 或更慢些。等温温度下保温时间为 4～6 h。然后冷至 500～600℃后，出炉空冷。

3）模具钢锻件的热处理。冷作模具钢和尺寸较大热模具钢锻件，一般采用退火处理。中小型热模具钢锻件可采用正火或正火、高温回火处理。仅仅为了消除应力，降低硬度，便于切削加工者，可单独采用高温退火。

形状复杂的大型模具钢锻件等温退火时，在珠光体区域里应停留足够长的时间。否则不能消除锻后冷却时形成的定向分布的粗针状贝氏体组织，这种组织会引起淬火混晶，并导致模具失效。

大型模具锻件装炉温度为 600～650℃。

4）锻件的余热处理

① 锻热淬火。锻热淬火是把锻造和淬火结合起来的一种工艺，即把锻后锻件立即置入淬火介质、获得淬火组织。这是一种节能，且强化效果明显的技术。

影响锻热淬火工件性能的因素如下。

锻造温度：综合考虑锻造工艺和提高强韧性要求，一般结构钢加热温度在 1 200℃为宜。

变形程度：综合考虑形变强化与回复再结晶的相互作用，一般锻热淬火件形变量控制在 15%～35%为宜。

停留时间：终锻后至淬火前的停留时间，要根据锻件的动态恢复与动态再结晶和静态再结晶机制而定。例如，碳钢终锻后停留长则晶粒长大快，应尽快淬火。某些合金钢再结晶困难，适当的停留有利于获得最佳的强韧化效果。但是总的来说停留时间不宜过长。

淬火介质与回火温度：为防止淬火裂纹，油温控制在 60～110℃为好，锻件出油温度一般为 100～150℃。锻热淬火件具有较高的抗回火性，故其高温回火温度比普通淬火后回火温度提高约 40℃。

锻热淬火是形变加高温淬火，具有形变强化与淬火强化两种机制，故能明显提高锻件的强韧性。锻热淬火节省了淬火加热工序。每吨锻件可省电 400 kW·h。简化了工序，缩短了周期，节省了工时。锻后立即人油淬火，减少了热辐射对环境的不良影响，有利于劳动条件的改善。

② 锻热等温退火。等温退火主要参数选择如下。

锻后均温温度 T_1：一般为 900～950℃。应高于 Ac_3。

等温温度 T_2：一般为 610～680℃，应根据锻件的材料和要求的硬度而定。易形成带状组织和材料，T_2 应低些。要求硬度低的，T_2 应高些。反之应低些。

高温回火温度 T_3：应靠近或低于 Ac_1，一般为 690℃左右。

均温时间 t_1：以达到均温为准，应根据锻件的有效厚度和形状来确定。

急冷时间 t_2：一般按 40～50℃/min 计算。急冷是本工艺的关键工序，为避免形成带状组织，在锻件温度允许的情况下，冷速可以适当加快，终锻后在 6 min 左右冷至 T_2。冷却方法一般采用风冷。



等温时间 t_3：主要保证充分相变并消除应力。一般不少于1.5～2 h。

等温转变时间 t_4：随材料性质而异。一般合金钢为20 min左右。

高温回火时间 t_5：随材料和 T_2，T_3 有关。T_2，T_3 低则 t_5 长，反之则短。一般为2 h左右。

③ 利用锻件部分余热进行热处理。当锻件锻后冷到 A_{r1} 以下（500℃左右），奥氏体已发生完全转变。随即将锻件入炉加热到 A_{c3} 以上进行正火（或正火加高温回火），调质，等温退火等热处理方法。用锻件部分余热进行热处理，可节省从室温加热至500℃的热能消耗，也属节能工艺。

5）大锻件热处理。由于大锻件受力复杂、工况特殊，加上锻件形体尺寸巨大、缺陷多、应力大，不均匀性凸现，再结晶、相变复杂，内部氢扩散与热扩散困难，所以，锻后热处理方法多、周期长。

大锻件热处理的意义，不仅要细化匀化组织、扩散氢气、消除应力、防止白点和裂纹，有的还要得到必要的组织性能，以满足超声波探伤，机械加工和使用性能的要求。所以，大锻件热处理方式多，工艺过程比较复杂，有许多行业标准可以借鉴。下面仅列几则规范供选用。

7 锻造工具的特点和应用

锻造工具、辅具和机械化装置等锻造工艺装备对提高自由锻造生产率和锻件质量有十分重要的作用。

7.1 锻造工具的分类

按应用状况可分为通用工具和专用工具两种。前者为多种锻件所公用。如砧子、剁刀、冲子、漏盘、夹钳、芯棒、马架。后者为某种锻件专用。如胎模、吊钩压弯工具、护环胀形工艺装置等。

按作用不同分为：镦粗类、拔长类、冲孔类、切割类、起重类工具等。

按用途又可分为：基本成形用工具、夹持工具、辅具、量具、机械化装置等。

按配置设备分，锤上锻造工具，水压机上锻造工具，其他设备上锻压工具。

7.2 锻造工装选用及设计原则

锻压工具、辅助工具和机械化装置选用和设计应注意如下问题。

1）应能提高锻造生产率，改进锻件质量，确保安全生产，减轻劳动强度。

2）节省材料和加工制造费用。尽量扩大适用性和修复翻新次数。

3）设计计算中，除进行强度、刚度校核外，还应考虑环境工况、服役条件的影响，如高温、不均匀受力、磨损、疲劳和交变载荷的作用等。

4）结构设计时，应考虑匹配设备的特点。如加载性质、工作空间尺寸、行程大小、夹持安装条件、装料卸料方法等。

5）折装容易、搬动方便、操作灵活。

6）安全可靠、使用寿命长。

8 锻造设备的造用

8.1 选择主要锻压设备的原则

1）满足锻件最大变形力（变形功）的需求。使锻坯变形所需的外力称为变形力，变形力的大小是选用锻压设备和确定工具强度的重要依据。

确定变形力（变形功）的方法有以下几种。

① 经验类比法　即依据经验资料、经验公式、图表概略确定变形力。

② 实验测定法　利用实测，如电测法确定力能参数。

③ 理论计算法　包括主应力法、变形功法、滑移线法、上限法和有限元法等。该方法精确，而且能给出各种过程和场量信息。

2）满足材料和模具对变形速度的要求，例如，有些对变形速度敏感，不易再结晶的材料，变形速度应该加以控制。为了减少过热磨损缺陷，变形速度也应控制。

3）满足工艺装置的安装、拆卸、运动的要求。

4）满足锻造操作的要求。

一般选择锻压设备，主要依据锻件材质、锻件与工具的接触承力面积、力能消耗最大的工序，并考虑选用设备的技术性能，以及车间设备负荷的平衡等多种因素，才能最后合理选用锻造设备的类型和能力。

由于常用的自由锻锤或锻造水压机不存在过载损坏问题，所以，自由锻设备的吨位和压力级差可以较大。同时一般锻压车间拥有设备数量有限，选择余地不大。所以，除了凭精确计算的变形力、变形功确定设备以外。在工程实际中常用估算方法概略确定锻造设备能力，从而快速选用自由锻设备。

8.2 自由锻锤吨位的概略估算

经验公式：

镦粗时：$G=(0.002\sim0.003)\ K'F$

式中，G 为锻锤落下部分重量，kg；F 为毛坯镦粗后与工具的接触面积，mm²；K' 为系数，当 σ_b 为400，600，800 MPa时，则 K' 为3～5，5～8，8～13。

拔长时：$G'=2.5F$

式中，F 为毛坯横截面积，cm²。

8.3 自由锻造水压机的选定

锻造水压机的压力，可按毛坯锻造时计算的最大压力确定。

主要成形设备选定后，还必须考虑相关配套设备的能力，才能保证大锻件的顺利生产。

9 自由锻造工艺举例

9.1 齿轮锻造工艺规程的制订

（1）工艺编制依据

1）齿轮零件图如图2.1-62所示。

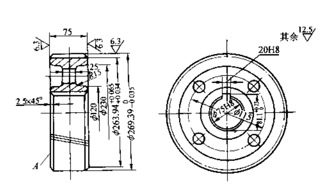


图2.1-62　齿轮



2）技术条件：调质硬度 235～248HB，齿轮外圆径向圆跳动允许 0.015 mm。

3）生产两件。

4）锻件材料为 42SiMn。

（2）绘制锻件图

根据锻件材质与技术要求，锻后应进行粗加工调质处理，按一般规定，增加 3 mm 粗加工余量，不再绘制粗加工图。

1）工艺分析。零件没有力学性能要求，所以不留试棒。$4\times\phi25$ mm 小孔很难锻出，全部加放余量。两端凹槽深 15 mm、宽 55 mm，因生产数量少，不锻出，加放余量。因坯料高度与孔径之比小于 3，且该中心孔径大于 30 mm，故应冲孔锻出。

2）确定机加工余量，锻造公差，画锻件图。根据零件的直径（$D=273$ mm）高度（$H=78$ mm）孔径（$d=72$ mm）得，径向余量公差为 14^{+2}_{-3}，轴向余量公差为 8^{+2}_{-3}，内孔余量公差为 14^{+3}_{-5}，绘出锻件图，见图 2.1-63。

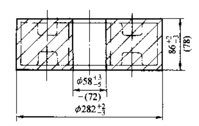


图 2.1-63 齿轮锻件图

（3）确定坯料重量与尺寸

1）锻件重量计算 $G_{锻}$

$$G_{锻}=\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)\times H\times\rho$$

$$=\frac{\pi}{4}(2.82^2-0.58^2)\times0.86\times7.85\ \text{kg}=41\ \text{kg}$$

2）计算坯料重量 $G_{坯}$

$$G_{坯}=G_{锻}+G_{芯}+G_{烧}$$

芯料重量 $G_{芯}$ 按冲孔高度的三分之一计算，则

$$G_{芯}=\frac{\pi}{4}d^2\rho\frac{H}{3}$$

$$=\frac{\pi}{4}\times0.58\times7.85\times\frac{0.86}{3}\ \text{kg}=0.6\ \text{kg}$$

$G_{烧}$ 按一火完成，烧损取 3%。

则坯料重量为：

$$G_{坯}=G_{锻}+G_{芯}+G_{坯}\times3\%$$

$$G_{坯}(1-3\%)=G_{锻}+G_{芯}$$

$$G_{坯}=\frac{G_{锻}+G_{芯}}{1-3\%}$$

$$=\frac{41-0.6}{0.97}\ \text{kg}=43.3\ \text{kg}$$

取 43.5 kg

3）选择坯料规格　坯料高度一般应满足镦粗比为 2 以上的要求，于是 $H_0=86\ \text{mm}\times2=172$ mm，按规格取 180 mm，则坯料直径为：

$$D_0=\sqrt{\frac{4\times G}{\pi\times\rho\times H_0}}$$

$$=\sqrt{\frac{4\times43.5}{\pi\times7.8\times1.8}}\ \text{mm}=198\ \text{mm}$$

按标准取 195 mm

再按此直径，由公式 $G_{坯}=\frac{\pi}{4}D_0^2\rho H_0$ 算出下料长度为：

$$43.5=\frac{\pi}{4}\times1.95^2\times7.85\times H_0$$

$$H_0=186\ \text{mm}$$

按规定，下料尺寸高度与直径之比应在 1.25～2.5 之间，而现在下料尺寸之比，只有 186/195＝0.95，小于 1.25，下料比较困难。考虑下料方便，将坯料长度增加到 250 mm，重新计算坯料尺寸如下：

$$D_0=\sqrt{\frac{4\times G}{\pi\times\rho\times H_0}}$$

$$=\sqrt{\frac{43.5}{6.16\times2.5}}\ \text{dm}=1.68\ \text{dm}$$

按轧材规格取 D_0 为 165 mm，再按此直径及毛坯重量，算出下料长度 $H_0=2.59$ dm，取 $H_0=260$ mm。

所以，实用坯料规格为 $\phi165\ \text{mm}\times260$ mm。

（4）确定变形工序

1）工序顺序　该类锻件一般采用：镦粗⟶冲孔⟶修整。

2）工序尺寸　为了保证修整后锻件的高度，坯料应该加高。考虑冲孔毛坯尺寸比 D_0/d 在 2.5～5 之间，冲孔毛坯高度定为锻件高度的 1.1～1.2 倍。于是，坯料高度应为 86 mm×1.1＝94.6 mm，取 95 mm。以此计算坯料直径为 $\phi268$ mm。所以，确定坯料尺寸为 $\phi268\ \text{mm}\times95$ mm，冲孔直径为 $\phi58$ mm，然后修整到锻件要求的尺寸。

（5）选择设备与工具

按坯料规格与锻件尺寸，查表用 750 kg 锻锤。所用工具除冲子、漏盘、钳子外，勿需其他专用工具。

（6）确定加热，冷却和热处理工艺

1）按 42SiMn 钢，$\phi165\ \text{mm}\times260$ mm 坯料，可采用高温装炉，快速加热。升温速度查表为 0.66～0.77 h/100 mm，取 0.75 h/100 mm，则加热时间按坯料直径计算为 1.65×0.75＝1.23 h，取 1.5 h 即可。

2）锻后冷却，按 42SiMn 钢，锻件传热截面尺寸为 86 mm，可采用空冷。

3）锻后热处理，再退火处理工艺为：400℃ 入炉，840～860℃保温，随炉冷至 400℃后出炉空冷。

（7）填写工艺卡片

齿轮锻造工艺卡片见表 2.1-33。

9.2　600 MW 汽轮机转子锻造工艺规程

（1）技术要求

600 MW 转子系发电设备中的关键锻件，其受力复杂，工况环境特殊，要求强韧性好，残余应力小，组织性能均匀。为确保安全使用，需进行全面系统的检验。

600 MW 转子用钢为 33Cr2Ni4MoV。气体含量 $[H]\leqslant2\times10^{-6}$，$[O]\leqslant40\times10^{-6}$，$[N]\leqslant70\times10^{-6}$。力学性能：$\sigma_{0.2}=760$ MPa，$\sigma_b=860\sim970$ MPa，$\delta=16\%$，$\phi=45\%$，$a_k=42\ \text{J/cm}^2$，FATT＝13℃，超声波探伤缺陷，当量直径小于 $\phi1.6$ mm。中心孔探视和磁粉检查，不允许有大于 3 mm 长的缺陷。金相检验：晶粒度不大于 ASTM2 级，夹杂物不大于 3 级。此外，对粗加工，残余应力，硬度均匀性等都有严格的规定。

（2）生产流程及其要点

1）炼钢，要求钢包炉精练，吹氩搅拌，真空脱气。用 24 棱短粗型钢锭，发热冒口浇铸，热钢锭加热。

2）锻压采用 WHF 与 JTS 联合锻压成形方案。本工艺与国外同类工艺对比，JTS 次数有所减少。转子锻造时最后一火加热温度和压下量要求严格控制。

3）锻后热处理采用三次高温重结晶，三次过冷，长时间等温回火，以保证晶粒细化，充分扩氢，消除应力，防止白点等缺陷。

全部工艺中的关键环节都经过大量的实验室试验与计算机模拟，得到优选的工艺参数，并在生产中进行严格控制。

采用工艺的 CAD 锻造工艺卡片（表 2.1-34）与热处理规范（图 2.1-64）如下：

表 2.1-33　齿轮锻造工艺卡片

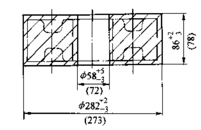
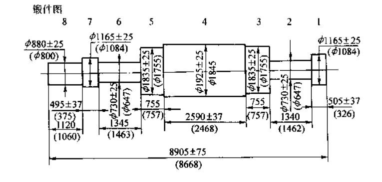
名称	齿轮				
类别	Ⅶ				
钢号	42SiMn				
坯料重量/kg	43.5				
锻件重量/kg	41.5				
锻件占总重量/%	95.4				
每坯锻件数	1				
火　次	温度/℃	操作说明	变形过程图	设　备	工　具
1	750～1 240	坯料 镦粗 冲孔 修正	φ165, 260 95 86, φ58, φ282	750 kg 锤	冲子 漏盘
编　制		审　核		批　准	

表 2.1-34　600 MW 转子 CAD 锻造工艺卡片

零件名称	600 MW 汽轮机低压转子	钢　号	33Cr2Ni4MoV
锻件单重	116 550 kg	锻件级别	特
钢锭重量	230 t	设备	120 000 kN 水压机
钢锭利用率	0.506	锻造比	镦粗　4.4　拔长　7.3
每钢锭制锻件	1	每锻件制零件	1



技术要求：
按照转子技术条件生产验收；
钢锭必须真空，采用单锥度冒口，钢锭热送至水压机车间；
钢锭第一热处理按专用工艺进行；
各工序必须严格执行工艺，精心操作；
生产路线：加热—锻造—热处理—发三金工；
印记内容：生产编号、图号、熔炼炉号。

续表 2.1-34

编　制		校　对		批　准	

火次	温度	操作说明及变形过程简图
1	1 260～750℃	拔冒口端到图示尺寸，压 ϕ1 280×1 200 钳口
2	1 260～750℃	用 B＝1 700 宽平砧压方至□2 160，按 WHF 法操作要领操作，倒八方至 2 310，略滚圆 ϕ2 310，剁水口，严格控制 4 320 尺寸，重压 ϕ1 280×1 200 钳口
3	1 260～750℃	立料，镦粗，先用平板镦至 3 900，再换球面板镦至图示尺寸，压方至□2 160，其余要求同二火，倒八方至 2 310，严格控制锭身及钳口长度，略滚圆 ϕ2 310
4	1 260～750℃	立料，镦粗，压方至□2 160，倒八方 2 310（操作要求同第三火）
5	1 260～750℃	立料，镦粗，要求同第三火，压方至□2 400，中心压实，每面有效压下量 190，锤与锤之间搭接 100
6	1 220～750℃	倒八方 2 125（注意防止产生折伤），滚圆 ϕ2 125（若温度好，接着下火）

续表 2.1-34

火次	温度	操作说明及变形过程简图
7	1 220 ~ 750℃	滚圆至 ϕ1 965，分料，滚两头至图示尺寸，如图示分料
8	1 220 ~ 750℃	锻出各部 精锻各部至成品尺寸 剁切修整出成品

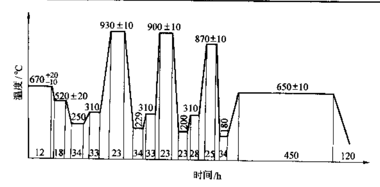


图 2.1-64　600MW 转子锻件热处理工艺

编写：郭会光（太原重型机械学院）



第2章　胎　模　锻

1　胎模锻造特点及应用

1.1　胎模锻造特点

胎模锻造是在自由锻造基础上发展起来的一种工艺方法，进一步发展又形成了模锻工艺，因此其特点介于两者之间。

（1）胎模锻与自由锻比较

1）胎模锻造时，锻件的最终形状和尺寸主要依靠胎模的模膛来保证，因此，它可以锻制形状复杂、尺寸比较准确的锻件，提高了材料利用率，减少了机械加工工时，如表2.2-1所示。

表2.2-1　吊车零件自由锻与胎模锻比较

零件名称	自由锻件重量/kg	胎模锻件重量/kg	节约金属重量/kg
5吨吊车齿轮	28.6	21.4	7.2
衬套	22.0	11.8	10.2
齿轮	62.8	33.8	29.0
10吨吊车齿轮	64.7	45.3	19.4
衬套	15.2	8.2	7.0
25吨吊车螺母	101.3	78.0	23.3

2）坯料金属在胎模内成形，由于金属流动受到模膛壁的限制而增加了压应力状态，致使金属纤维连续，内部组织比较致密，同时，减少了加热火次而减少了表面的氧化烧损，使锻件质量大为提高；

3）简化了操作，减轻了工人劳动强度，也降低了对工人的技术要求，可提高劳动生产率2～5倍。但增加了专用胎模，提高了锻件生产费用；当采用相同吨位的自由锻锤时，采用胎模锻造生产的锻件比采用自由锻造生产的锻件一般要轻一半以上。

（2）胎模锻与模锻比较

1）胎模是不固定于设备上的活动模具，可以有一个以上的分模面，一副以上的模具，制坯比较精细，又可局部成形，因此可在一种自由锻设备上锻出形状较为复杂的锻件，材料利用率也有所提高（表2.2-2）。

2）工艺灵活多样，由于采用活动胎模和多种变形工序，胎模锻几乎可以锻出所有不同类型的锻件。

3）可以局部成形，可以改变制坯程度，可以随时调整坯料金属在胎模内的变形量，这样有可能在较小设备上锻出相同形状与尺寸的模锻件（表2.2-2）。

表2.2-2　解放牌汽车变速箱轴和齿轮锻件金属材料消耗

零件名称	胎模锻				模锻			
	锻件重量/kg	坯料重量/kg	坯料尺寸/mm	设备	锻件重量/kg	坯料重量/kg	坯料尺寸/mm	设备
主轴一、倒速齿轮	7.05	7.5	$\phi90\times156$	750 kg空气锤	7.6	8.5	$\phi90\times170$	20 kN模锻锤
主轴二、三速齿轮	6.25	6.5	$\phi90\times135$	同上	6.11	7.13	$\phi80\times182$	同上
主轴四速齿轮	4.3	4.5	$\phi80\times120$	同上	4.32	5.0	$\phi75\times145$	同上
主轴五速齿轮	1.95	2.05	$\phi65\times82.5$	400 kg空气锤	1.82	2.4	$\phi50\times$ 1 105/7件	8 MN平锻机
副轴三速齿轮	3.65	3.8	$\phi75\times114$	750 kg空气锤	3.91	4.4	$\phi75\times127$	20 kN模锻锤
副轴四速齿轮	5.2	5.5	$\phi80\times146$	同上	5.22	6.2	$\phi80\times159$	同上
副轴五速齿轮	5.65	6.0	$\phi90\times125$	同上	5.85	6.6	$\phi80\times169$	同上
主动轴（第一轴）	6.75	7.1	$\phi75\times212$	400 kg空气锤	6.39	6.71	$\phi42\times622$	12 MN平锻机
主轴（第二轴）	11.0	11.6	$\phi70\times394$	250 kg空气锤	9.73	11.9	$\phi70\times395$	30 kN模锻锤
副轴（第三轴）	11.5	12.1	$\phi75\times369$	同上	10.8	12.9	$\phi85\times285$	同上

4）胎模材料价廉、体积小、制造较简便，不需要大型与专用模具加工与热处理设备，因面模具费用低。

其缺点是：

1）加热金属长期焖模操作，锻件温度下降快，变形抗力迅速增大，且胎模锻时锤头通过胎模打击锻件，胎模高度减少了锤头有效打击能量，加上打击速度低，导致惯性产生的挤压充满模膛效应不明显，因而成形能力低，模具寿命低；

2）胎模制造简易，加工精度较低，此外润滑条件差，操作时氧化皮难于清除，所以锻件尺寸精度低，表面质量不高，且一般胎模锻件的机加工余量和尺寸公差都较模锻件大；

3）胎模活动、分散，加热火次多，因此劳动强度仍然很大，生产效率也不高。

1.2　胎模锻的应用

各种锻造方法由于在技术上与经济上所具有的特点，都有一定的应用范围。主要取决于锻件生产批量大小，同时也要考虑锻件形状、尺寸、重量及现有生产条件等。

一般说来，锻件生产批量在几件、几十件间，形状简单，尺寸与重量较大时，多采用自由锻；锻件生产批量在几十件，几百件至几千件，形状较复杂的中小型锻件时，多采用胎模锻；锻件生产批量在千件、万件以上，形状复杂时，多采用模锻或其他专用工艺。

由此可见，胎模锻是一种适用于中小型锻件、中小批量生产的锻造方法。它首先在中小批生产类型工厂如机床制造、压缩机制造、起重运输机械制造、建筑工程机械制造、石油化工机械制造、机车车辆制造等的锻造车间得到广泛应用；其次，在一些单件小批生产类型工厂如重型机床制造、



冶金矿山机械制造、电站动力机械制造、船舶制造等的锻造车间内，如锻件生产批量较大或为了节约金属，减少锻件机械加工工时，也常采用胎模锻；除此，在大批大量生产类型工厂如汽车制造、拖拉机制造、轴承制造、动力机制造、农机具制造等的锻造车间内，自用机修备件、工模具锻件也可采用胎模锻。有些锻件虽然生产批量较大，但需用大型或特殊锻压设备如大型平锻机或多向模锻水压机而设备利用率很低或现场尚不具备所需设备条件时，采用胎模锻也是合理的(具体实例见第6节)。

2 胎模锻件分类及胎模锻件图设计

2.1 胎模锻件分类

为了便于整理和分析各种锻件的胎模锻工艺并掌握其规律性，必须对数量繁多的锻件进行分类。分类时主要考虑以下原则。

1）分类尽可能与胎模锻的基本工艺方案一致。

2）分类尽可能比较全面反映胎模锻件的多样性及其应用的广泛性。

3）分类名称尽可能直观。

根据这些原则，胎模锻件的分类如表2.2-3及图2.2-1～图2.2-14所示。

表2.2-3 胎模锻件分类

序号	锻件特征及分类			锻件简图
1	旋转体	长轴线	台阶轴	见图2.2-1
2			轴杆	见图2.2-2
3			凸缘（法兰）轴	见图2.2-3
4		短轴线	单凸缘（法兰）	见图2.2-4
5			双凸缘（法兰）	见图2.2-5
6			有孔凸缘（法兰）	见图2.2-6
7			环筒类	见图2.2-7
8			杯筒类	见图2.2-8
9			轮盘类	见图2.2-9
10	非旋转体（自由形状）	长轴线	直杆	见图2.2-10
12			弯杆	见图2.2-11
13			枝杆	见图2.2-12
14			叉类	见图2.2-13
		短轴线	多枝体	见图2.2-14

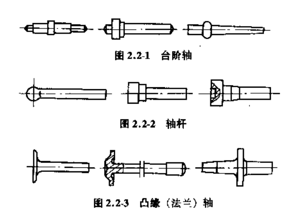


图2.2-1 台阶轴

图2.2-2 轴杆

图2.2-3 凸缘（法兰）轴

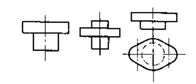


图2.2-4 单凸缘（法兰）

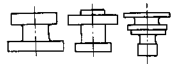


图2.2-5 双凸缘（法兰）

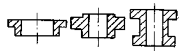


图2.2-6 有孔凸缘（法兰）

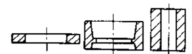


图2.2-7 环筒类

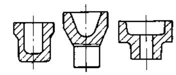


图2.2-8 杯筒类

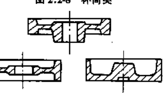


图2.2-9 轮盘类

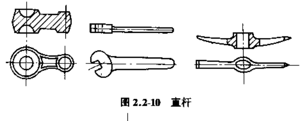


图2.2-10 直杆

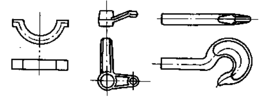


图2.2-11 弯杆

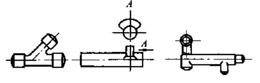


图2.2-12 枝杆

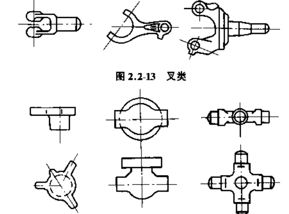


图 2.2-13　叉类

图 2.2-14　多枝体

2.2　胎模锻件图的设计

(1) 基本要求

锻件图是在零件图的基础上，考虑了胎模锻造生产特点并加以修改而绘制成的。

锻件图有冷锻件图及热锻件图两种。冷锻件图表明锻件在室温状态时的几何形状与尺寸，供锻件检验使用。热锻件图表明锻件在变形终了温度时的几何形状与尺寸，供胎模制造和检验使用。

胎模锻造时，金属是在加热状态下置于模具型槽内发生变形的，因此制订锻件图应满足下列的要求。

1) 出模方便　金属变形后，要保证模具能分得开、锻件能取得出，即锻件的分模面要选得合理，必要时还须在妨碍出模的地方添加上被称为工艺余块的多余金属。若无顶出条件，模具型槽的垂直面应设模锻斜度以便锻件出模。

2) 保证尺寸　金属经过加热，表面氧化皮很难清除干净，冷却后还有体积收缩，为了保证零件所需的表面粗糙度及尺寸精度要求，在设计模具时应将零件尺寸放大，即在要求加工部位加上机械加工余量，然后对所有尺寸再按收缩率放大。此外，考虑模具磨损以及锻件在冷却过程中的形变，需要对全部尺寸给出合理的公差范围。

3) 变形合理　胎模锻造时，金属在外力作用下产生塑性流动，然后充满模膛而成形。因此在模膛设计时，尽可能减少金属的流动阻力，首先在转折处，应给出必要的圆角半径，否则金属在充填过程中会因倒流而出现折叠。此外，需要冲孔的地方要设计冲孔连皮或压凹。

综合上述三方面要求，制订锻件图时应考虑分模面、工艺余块、模锻斜度、机械加工余量、收缩率、尺寸公差、圆角半径以及冲孔连皮、压凹等因素，然后注上必要的技术条件。下面按制订次序进行说明。

(2) 锻件图设计

1) 确定分模面　胎模锻造比较灵活，模具套数多，不同工序中可选取不同的分模面，但在一般情况下，锻件多在最大截面处进行分模并垂直于作用力的方向。当有多个分模方案可供选择时，如图 2.2-15 所示锻件若采用合模生产，就可在 $a-a$、$b-b$、$c-c$ 及 $d-d$ 四处进行分模，这时应进一步比较其他的工艺因素，以选择比较合理的一种。

① 能及时发现上下模错移。图 2.2-15 所示锻件中的 $a-a$、$b-b$ 两种分模面虽都是最大截面，但不如在 $c-c$ 与 $d-d$ 分模能及时发现上下模的错移。

② 金属容易充满模膛。当在 $a-a$、$b-b$、$c-c$ 三个截面分模时，金属主要依靠镦粗成形易于充满模膛，而按 $d-d$ 分模，锻件法兰处的金属则需由挤压充填成形。

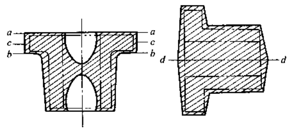


图 2.2-15　分模面方案的选择

③ 提高金属利用率。采用 $a-a$、$b-b$、$c-c$ 分模时可进行冲孔或压凹。若按 $d-d$ 分模不仅没有这个可能，同时为了保证出模，还必须在内孔添加工艺余块成为实心件，这样，金属利用率就大为降低。

④ 制模方便。图 2.2-15 中表示的四种分模面都为平面，比折面、弧面的制造方便，尤其是前三种分模面，其模膛都为旋转体，可在一般车床上加工，制模过程大为简化。

比较上述几点分析，以 $c-c$ 截面分模为宜。若不冲内孔或模外冲孔也可取 $a-a$ 分模，当锻件杆部较长时，则应采用 $d-d$ 分模。对于尺寸较小的锻件，选用 $d-d$ 分模还可实行一模多件生产。

对于大多数轴对称形的锻件，胎模锻造多应用套筒模进行成形。这样，上述几种因素的影响就不很大，分模面可选在主要变形区的大端面处，如图 2.2-16 所示的 $a-a$ 截面。

套筒模结构灵活，还可运用组合模块形式。这时就能在几处同时分模，除横向外，还可在纵向分模，如图 2.2-16 中的 $b-b$ 截面。

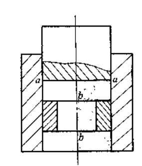


图 2.2-16　筒模锻造时锻件分模面选择

2) 确定机械加工余量及公差　影响机械加工余量及公差数值的因素很多，主要与锻件的外形尺寸、批量、技术要求及生产单位的设备、模具、技术条件等有关。

表 2.2-4 为在通常情况下选用的胎模生产锻件机械加工余量及公差的统计数值。当表面粗糙度高于 $R_a0.8\ \mu m$ 时，可将该处余量增加 0.25～0.5 mm，公差不变。但在通常情况下，锻件的单边余量很少有超过 5 mm、公差超过 $^{+3.0}_{-1.5}$ 的。

表 2.2-4　胎模生产锻件的机械加工余量及公差

mm

锻件外形尺寸	单边余量	公差
<150	1.5～2.5	$^{+1.0}_{-0.5}$ ～ $^{+1.6}_{-0.8}$
150～300	2.5～3.5	$^{+1.6}_{-0.5}$ ～ $^{+2.2}_{-1.1}$
>300	3.5～4.5	$^{+2.2}_{-1.1}$ ～ $^{+2.8}_{-1.4}$

胎模锻造时的模具磨损、欠压（打不靠）都易使锻件尺寸增大，高度方向尤其如此，因此正公差较大，负公差取其

一半。选用筒模闭式锻造时，欠压现象更为普遍，高度方向的正公差还可较表 2.2-4 所列数值再略为放大些。内孔或压凹的尺寸公差应取相反符号并改变上下位置，而余量比外径余量增 0.5 mm，以保证机加工后的零件尺寸。例如对外形尺寸 < 150 mm 的锻件，其内孔单边余量为 2.0 ~ 3.0 mm，而公差为 $^{+0.5}_{-1.0}$ ~ $^{+0.8}_{-1.6}$。

3）确定模锻斜度　由于锻件变形后模具弹性变形恢复时产生的力作用于锻件上，继而转化成为锻件出模的摩擦阻力；另外锻件冷缩紧抱模芯，又使内壁出模阻力较外壁更为大些。这些因素都给锻件出模带来很多困难。

为了变形后便于上下模分开、锻件不卡在型槽内，可在型槽内、外壁上作出斜度，其数值在制模业中已有系列——30′、1°、1°30′、3°、5°、7°、10°、12°……。图 2.2-17 所示锻件，其外壁斜度一般取 $\alpha = 5° \sim 7°$，内壁斜度增一级，即 $\beta = 7° \sim 10°$，条件困难处可适当再增，其中跳模应取上限值。若有顶出可能，锻件外壁以及有些合模的个别地方，可取 1° ~ 3°，甚至不设斜度。对杆部较长而很少变形部分取 30′ ~ 1°30′。

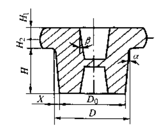


图 2.2-17　锻件的模锻斜度

模膛开出模锻斜度后，锻件一端会较厚尺寸增大，即 $D = D + 2X$（见图 2.2-17），需要时可按公式 $X = H\tan\alpha$ 计算或查表。当分模面上因模膛深度不一，即 $H_1 \neq H_2$，而出现增宽不同时，则应以增宽的一端为基准。

4）确定圆角半径　在金属充填模膛的过程中，锻件凹圆角半径 R 是一个重要的工艺因素，尤其对于具有明显金属流动转折的锻件，如带轮辐、轮毂的齿轮件、带工字截面的连杆件等更是如此。当 R 太小，锻选时会很快自然磨损，甚至因金属倒流而形成折叠（见图 2.2-18）；太大，使金属损耗增加。

锻件凸圆角半径 r 可小些，并需保证该处留有足够的加工余量。考虑到凸圆角处有可能充填不满，一般希望不要超过该处单边余量 a 的一倍，即 $r \leqslant 2a$。

锻件凹、凸圆角半径 R 及 r 与该处的高度 h 及宽度 b 有关（见图 2.2-18），其数值可按图 2.2-19 箭头所示查取。由于制模标准中的圆角半径已成系列—— 1、1.5、2、3、4、5、6、7、8、10、12、15 mm……，故从图中查得的数值应向系列靠拢，同一锻件上的圆角半径数值不要选得太多，以便模具制造。

5）确定冲孔连皮及压凹　胎模锻造时，锻件的内孔无法冲穿，需要留下一层称为冲孔连皮的金属，锻后再予以冲去。若内孔不深，连皮可留于端面；内孔较深时则留于中间较为合适。由于胎模锻件的孔径一般不大，如孔径 d 在 30 ~ 50 mm 之间时不予冲孔，内孔只需添放工艺余块，所以连皮采取平底形式，其厚度尺寸可查表 2.2-5。连皮尺寸过小容易引起变形抗力增加，冲头变形严重而使模具寿命降低。尺寸过大，金属损耗增大。所以只有当内孔较深或设备吨位不足时才考虑适当增厚 1 ~ 2 mm。若内孔孔径较大，在制坯过程中建议采用自由锻方法将孔予先冲去。

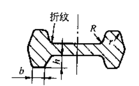


图 2.2-18　锻件的圆角半径

对于盲孔锻件可采用压凹形式锻出浅孔，孔底以球面为宜。孔径 d < 25 mm 时不压凹。

经过上述五方面的考虑，就可在零件图的基础上绘制出冷锻件图。当制订热锻件图时还需考虑冷缩率。

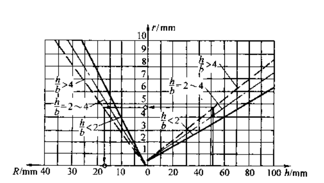


图 2.2-19　锻件圆角半径选用图

表 2.2-5　连皮形式及尺寸

mm

连皮形式												
H / 连皮尺寸 / d	≤25			>25 ~ 50			>50 ~ 75			>75 ~ 100		
	S	R_1	R_2	S	R_1	R_2	S	R_1	R_2	S	R_1	R_2
≤50	3	4	5	4	6	8	5	8	12	6	14	16
>50 ~ 70	4	5	7	5	7	10	6	10	14	7	16	18
>70 ~ 100	5	6	8	6	8	12	7	12	16	8	18	20



6）考虑冷缩率　为保证金属在锻造冷缩后能达到冷锻件要求的尺寸，设计模具时，应将冷锻件各尺寸放大，即加上冷缩量。

冷缩率与金属物理性能、锻件终锻温度及外形尺寸有关。对于小形件或细长、扁薄易冷件则可不加考虑。表2.2-6所列为各种有色金属合金及黑色金属的冷缩率。终锻温度高、尺寸大的取上限值。

表2.2-6　常用有色金属合金及黑色金属的锻件冷缩率

%

材料 终锻温度	镁合金	铝合金	铜、钛合金	黑色金属
较低（一般条件）	0.5～0.8	0.6～1.0	0.7～1.1	0.8～1.2
较高（终锻前重新加热）	0.8～1.0	1.0～1.2	1.1～1.4	1.2～1.5

7）考虑技术要求　凡是在锻件图形上无法表明的其他要求，如锻件热处理、测试项目、表面质量、外形偏差及图上未注明的圆角半径、模锻斜度等内容可在图的右下方以技术要求形式提出。

3　胎模锻工艺

胎模锻工艺由一系列工序组成。按其变形性质及作用，分为基本工序、辅助工序及修整工序。基本工序使毛坯得到所需形状。辅助工序使毛坯预先产生局部变形，以便进行基本工序（如拔长前压肩和冲孔前镦粗等）。修整工序用于消除基本工序伴生的有害变形，如校正镦粗产生的弯曲、鼓肚；切去拔长后端部凹心；冲孔后校孔等。

胎膜锻是介于自由锻与模锻间的一种锻造方法，一方面它大量采用自由锻基本工序和模锻基本工步；另一方面，由于采用活动模具，又具有一些特有工序（见表2.2-7）。由表可见，胎模锻所能完成的基本工序比自由锻和模锻都要丰富多采，这就是胎模锻件种类繁多，胎模锻工艺灵活多样的原因所在。

胎模锻所采用的基本工序，按其变形特点，大致可分为6组：

1）镦粗、拔长、摔形、扣形；
2）冲孔、扩孔；
3）弯曲、翻边；
4）剁形、劈形；
5）挤压、焖形；
6）冲切。

制坯对于长轴线锻件就是如何沿轴向合理分配金属（如台阶轴）；对于短轴线锻件就是如何沿径向合理分配金属（如齿轮）。

表2.2-7　胎模锻和自由锻、锤上模锻基本工序

序号	胎模锻	自由锻	锤上模锻
1	镦粗（镦粗、局部镦粗）	镦粗（镦粗、局部镦粗）	镦粗、压扁
2	拔长（拔长、心轴拔长）	拔长（拔长、心轴拔长）	拔长
3	摔形		滚压
4	扣形（扣形、卡形）		成形、卡压
5	冲孔	冲孔	
6	扩孔（冲头扩孔、心轴扩孔）	扩孔	
7	弯曲	弯曲	弯曲
8	翻边（内翻边、外翻边）		
9	剁切（剁切、剁形）	剁切	切断
10	劈形		
11	挤压（镦挤、冲挤、翻挤、拉挤、劈挤）		
12	焖形		终锻、预锻
13	冲切（切边、冲形）		切边、冲去连皮
14		错移	
15		扭转	
16		锻焊	

焖形相当于锤上模锻的终锻，分为开式焖形和闭式焖形两种。开式焖形时，因有飞边调节多余金属，补偿制坯误差，故对备料和制坯精度要求较低。闭式焖形时，没有飞边，对备料和制坯精度要求高。

3.1　镦粗

镦粗是使坯料高度减小、截面增大的锻造工序。它是胎模锻造中最主要的工序，也是许多其他锻造变形工序的基础。

（1）整体镦粗

它是坯料全部长度上均产生变形的镦粗，又可分为实心镦粗与空心镦粗（镦环）两种（图2.2-20），前者应用较多，后者应用较少。

胎模锻中采用镦粗工序的目的，除了得到所需中间毛坯外，有时主要是为了改善流线方向（如齿轮锻件）和去除氧化皮。

实心镦粗（图2.2-20a）时的主要缺陷是纵向弯曲，故坯料尺寸应遵守镦粗规则，即镦粗比（镦粗部分长度与直径比值）$\frac{l_0}{d_0}$不大于2.0～2.5，否则很易产生弯曲。

l_0　d_0　D_x　h_0　S　d_1　d_0

(a)实心镦粗　　(b)空心镦粗

图2.2-20　整体镦粗

为了便于将镦粗后的毛坯放入模膛和造成焖形时的良好镦粗充满条件，镦粗后毛坯外径应略小于模膛最大直径。当生产批量较大时，可用垫铁限制镦粗毛坯高度的方法来控制镦粗后的外径。

在一些胎模锻工艺中，有时还需要消除毛坯镦粗时所形成的鼓肚。当生产批量不大时，可用平砧滚圆消除；当生产批量较大时，可采用垫环镦粗。

空心毛坯整体镦粗时（图2.2-20b），毛坯高度h_0减小，

外径 d_0 增大，内径 d_1 缩小。也就是说金属的径向流动存在一分流面，其直径为 D_x。大于 D_x 部分的金属径向外流，小于 D_x 部分的金属径向内流。一般金属径向外流阻力小于径向内流阻力。当毛坯高度 h_0 与壁厚 $S=\frac{d_0-d_1}{2}$ 比值超过一定范围后，环壁在锤击力作用下失稳，在内孔壁部形成夹层。不形成夹层的合理尺寸由实验确定（图 2.2-21）。

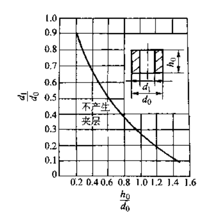


图 2.2-21 镦环合理尺寸

（2）局部镦粗（图 2.2-22）

它是坯料局部长度上产生镦粗变形的工序，可分为端部镦粗（顶镦）、中间镦粗与空心毛坯局部镦粗（镦筒）。

与整体镦粗相同，局部镦粗也必须遵守镦粗规则。但常因坯料与模孔间存有间隙，夹持不紧，故允许镦粗比应降为 1.5～2。

空心毛坯局部镦粗又可分为有心轴与无心轴两种。若无心轴，变形部分合理尺寸可参见图 2.2-21；若有心轴（图 2.2-22c）不受此限制，但 $\frac{h_0}{S}$ 以不大于 2.5～3 为宜。

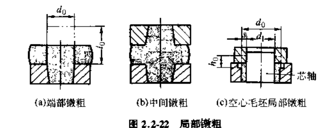


图 2.2-22 局部镦粗

（3）滑动镦粗（图 2.2-23）

滑动镦粗本质上是一种连续送料的局部镦粗，金属聚集过程与局部镦粗类似。它是胎模锻特有的工艺，用于 $\frac{l_0}{d_0}$ 较大的锻件成形具有突出的优点。

滑动镦粗的特点如下。

1）坯料不受镦粗比 $\frac{l_0}{d_0}$ 大于 2～2.5 的限制。如图 2.2-23a 所示，坯料镦粗比 $\frac{l_0}{d_0}$ 虽然大于 2.5，但一部分长度在冲头 1 中，实际镦粗比 $\frac{l'_0}{d_0}<2$，故可采用一副模具直接镦粗成形。在镦粗过程中，已镦粗部分将冲头 1 逐步顶起，直至其上端面与冲头 2 之凸缘底面相接触，然后冲头 1 与 2 同时下移，获得最后形状。

2）对于中间窄凸缘锻件，采用滑动镦粗成形时，胎模结构简单，生产率高（图 2.2-23b）。

3）滑动镦粗与焖形相结合，可制造出端部具有凸台或凹坑的锻件（图 2.2-23c）。

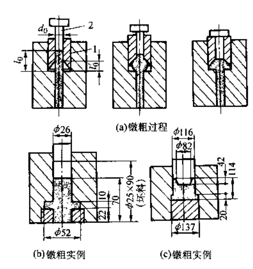


图 2.2-23 滑动镦粗

3.2 拔长

拔长是使毛坯断面积减小、长度增大的锻造工序，拔长是长轴线胎模锻件的主要制坯工序之一，也是锻造工序中变形最复杂和占用工时最多的工序。

实心毛坯平砧拔长（图 2.2-24a）是拔长的基本形式。当毛坯（或锻件）直径与坯料直径相差不大时，可采用光摔直接摔形拔长（图 2.2-24b），以省去专门的摔光修整工序。当锻件杆部在中间且拔长长度小于砧宽时，应采用与锤上模锻拔长模膛相似的卡摔进行拔长（图 2.2-24c），卡摔断面形状可以是棱形（或椭圆的），也可以是矩形的，视锻件截面形状而定。

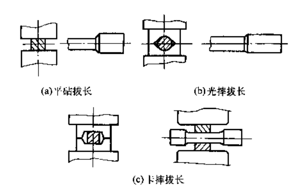


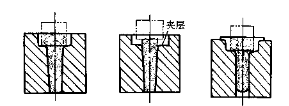
图 2.2-24 拔长

在一些销轴、凸缘轴和高凸台锻件的胎模锻工艺中，常采用拔长制坯得到杆部或凸台。为了保证锻件质量，拔长时应注意如下几点。

1）拔长前的压肩位置与压肩深度一定要准确。压肩位置不准，必然造成金属分配不均匀，若杆部金属过多，拔长后必然过长，焖形时就会在杆部根部形成夹层（图 2.2-25b）；若杆部金属过少，拔长后必然过短，焖形时虽有一部分金属进入杆部，但杆部总长度仍达不到锻件所要求的尺寸（图 2.2-25c）。毛坯合理的杆部长度应等于锻件的杆部长度（图 2.2-25a）。根据这个原则，坯料拔长前的压肩位置（图 2.2-26）应按下式计算：

$$L=\frac{d^2}{D_0^2}l$$

式中，L 为坯料上用以拔长杆部的长度，mm；d 为杆部直径，mm；l 为杆部长度，mm；D_0 为坯料直径，mm。



(a)毛坯杆部长度合理 (b)毛坯杆部长度过长 (c)毛坯杆部长度过短

图 2.2-25 坯料压肩不准造成的缺陷

压肩深度过大，将造成锻件杆部直径方向尺寸加工余量不足，或焖形时在杆部根部形成夹层。合理的压肩尺寸（见图 2.2-26）应是

$$d_1 = d + (3 \sim 10)\text{mm}$$

式中，d_1 为压肩直径，mm；d 为锻件（或毛坯）杆部直径，mm。

胎模锻时常用型摔同时压肩和成形，以提高生产率和减少偏心。

2）当只在坯料端部拔长制坯时，应避免杆部端面产生凹心及夹层（图 2.2-27），因为这种缺陷在以后的焖形工序中是无法消除的。不产生凹心的最小拔长长度：对圆形截面坯料，$L > 0.3D_0$（图 2.2-27a）；对方形截面坯料，$L \geqslant (0.4 \sim 0.5)\ A$（图 2.2-27b）。当拔长长度不满足上述要求时，常采用增加坯料长度，拔长后切头，或采用双件压肩，拔长后剁开。

3）拔长时应留有足够的摔光量，以便摔光，摔圆，因为这种毛坯在以后的胎模内镦头时，杆部直径几乎不再变形。

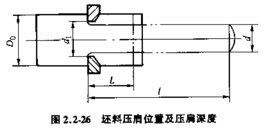
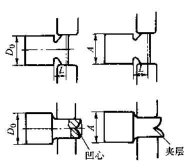


图 2.2-26 坯料压肩位置及压肩深度



(a)坯料的圆形截面 (b)坯料的方形截面

图 2.2-27 端部拔长时最小拔长长度

3.3 摔形

摔形是坯料在摔模中不断旋转并按需要重新分配金属的变形工序（图 2.2-28），是胎模锻中应用较多的一个工序，与锤上模锻滚压模膛中滚压工步相近。

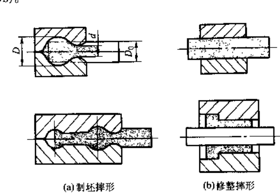
（1）制坯摔形（图 2.2-28a）

根据锻坯长度可采用局部摔形与整体摔形两种形式。当毛坯杆部直径 d 与头部直径 D 比值（$\frac{d}{D}$）在 0.6～0.9 范围内，可用坯料直接摔形。由于金属与摔模始终接触，迅速降温，摔模一端不封闭，金属外流，所以胎模锻制坯摔形时，摔模聚料能力低于锤上模锻滚压模膛。为此，坯料直径 D_0 一般应等于或略小于头部最大直径，即

$$D_0 \geqslant (0.85 \sim 1.0)\ D$$

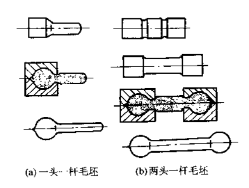
当$\frac{d}{D} < 0.6$时，一般不能由坯料直接摔形，需要首先压肩和拔长后再进行摔形。

对于只有一个头部的锻坯，可先预拔杆部，再用摔模摔形，最后终拔杆部并校准长度（图 2.2-29a）；对于两端皆有头部的锻坯，一般均需压肩，然后用窄摔子或在砧面上预拔杆部，再用摔模摔形，最后终拔杆部并找准长度（图 2.2-29b）。



(a) 制坯摔形 (b) 修整摔形

图 2.2-28 摔形方法



(a) 一头一杆毛坯 (b) 两头一杆毛坯

图 2.2-29 拔长—摔形方法

（2）修整摔形（图 2.2-29b）

主要指摔光与校整摔光。它常是旋转体长轴线锻件等必不可少的辅助工序。

3.4 扣形

扣形与锤上模锻卡压模膛与成形模膛的作用相近。毛坯在扣模中重新分配体积，但不旋转。扣形后一般均进行拍平。由于可进行反复扣形↔拍平工序，能比锤上模锻获得较准确的形状和较大的变形量。

扣形是胎模锻中常用的制坯工序之一，可得到对称与不对称的扁平毛坯。对有些锻件也可采用扣模最终成形。胎模锻中常用扣形方式主要有：单扇扣形、双扇扣形、压板扣形（图 2.2-30）。

胎模锻中一般不采用自由锻错移工序，而用扣形代替。





图 2.2-30 扣形方式

采用各种不同压铁，将毛坯局部卡压出所需形状的变形工序（又称卡形），其作用与扣形类似。例如，卡压出局部凸起，卡出十字形或多枝形，在毛坯端部卡出不易拔长的短台阶等（图 2.2-31）。

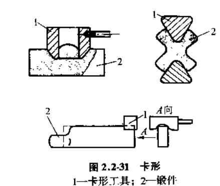


图 2.2-31 卡形
1—卡形工具；2—锻件

3.5 冲孔与扩孔

采用自由锻方法制造空心锻件的锻造工序，总称制孔。根据锻件形状与尺寸，可以采用多种多样的制孔方案。如图 2.2-32 所示为各类空心锻件的制孔方案，但在应用时尚需根据各厂生产经验和现有条件确定。尤其在图中分界线附近，几种制孔方案交错重叠。图中主要按锻件形状选择制孔方案，未考虑绝对尺寸的影响。事实上对于孔径小于 50 mm 的锻件，主要方案是冲孔及冲头扩孔。

图 2.2-33 所示为自由锻双面冲孔（简称冲孔），它是胎模锻中常用的制坯工序。

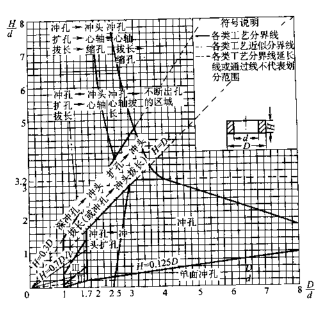


图 2.2-32 空心锻件制孔方案
Ⅰ—数件合模（或冲孔→心轴扩孔→镦环）；Ⅱ—冲孔→心轴扩孔；Ⅲ—冲孔→冲头扩孔→心轴扩孔；Ⅳ—冲孔→冲头扩孔→冲头拔长→心轴扩孔

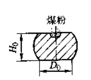
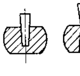
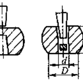




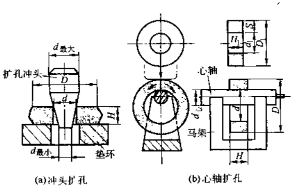
图 2.2-33 自由锻双面冲孔

双面冲孔的一般过程如下：先将坯料预镦，得到平整端面和合理形状［$H_0 < D_0$，$H_0 =$（1.1 ~ 1.2）H，$D_0 \geq$(2.5 ~ 3) d］，参见图 2.2-34。用冲子轻冲一下，目测或用卡钳测量是否冲偏，撒入煤粉，重击冲子，直至冲子深入锻件高度三分之二左右。翻转毛坯，把冲子放在毛坯出现黑印的地方，迅速冲除芯料，得到透孔。

扩大已有空心毛坯内孔的锻造工序，称为扩孔。扩孔时锻件外径同时增大，高度略有变化。

胎模锻主要采用冲头扩孔与心轴（马架）扩孔两种方法（图 2.2-34）。冲头扩孔时，锻件内外径增大，高度略减（图 2.2-34a）。毛坯承受切向拉应力与径向压应力，近似于厚壁筒变形。需要更换不同直径的扩孔冲头，因为每次孔径增大量（即 $d_{最大} - d_{最小}$）不大，仅为 15 ~ 30 mm。同时，不适用于扁平毛坯（冲头扩孔引起翻边变形）与高筒薄壁毛坯（冲头扩孔形成喇叭筒），所以应用范围较窄 $\left(\frac{D}{d} > 1.7,\ H \geq 0.125D\right)$。

在胎模锻中常采用类似的工具进行校孔，以得到光洁的内孔。心轴扩孔也称芯棒扩孔或马架（杠）扩孔（图 2.2-34b），是主要的扩孔方法。

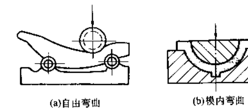


(a)冲头扩孔 (b)心轴扩孔

图 2.2-34 扩孔方法

3.6 弯曲

弯曲是改变毛坯轴线而断面变化较小的工序，自由锻与模锻中也都采用弯曲，胎模锻中常用的弯曲有两种形式：自由弯曲、模内弯曲（图 2.2-35）。



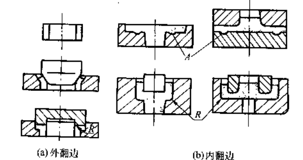
(a)自由弯曲 (b)模内弯曲

图 2.2-35 弯曲

当锻件有几个弯曲部分时，为了便于操作，一般应对弯曲半径较小、弯曲长度较短的部分先进行弯曲。

3.7 翻边

将薄壁筒筒壁变形为平面凸缘或将平面毛坯变形为薄壁杯筒锻件且筒壁厚度变化不大的工序，总称翻边。前者是外翻边（扩口），后者是内翻边（浅拉深）。翻边原是板料冲压中的一个变形工序，但在胎模锻中亦有采用（图 2.2-36）。



(a) 外翻边　　(b) 内翻边

图 2.2-36　翻边方法

外翻边（图 2.2-36a）主要用于薄壁有孔凸缘（法兰）的成形。这时在锻件内孔上端面不可避免地要产生较大的拉缩圆角 R。

内翻边（图 2.2-36b）主要用于薄壁杯筒的成形。为了避免得到较大的拉缩圆角 R，在预制毛坯时应考虑拉缩余量 A。

胎模锻翻边工序的变形规律，往往需要通过试验，才能达到预期效果。

3.8 劈叉

采用劈刀将毛坯局部分离但不产生废料的工序，称为劈叉（图 2.2-37）。其主要用于叉类、多枝类锻件制坯。其中主要采用挤压变形得到叉口的方式又称劈挤，它是胎模锻中特有的工序。

劈挤一般在专用劈挤模中进行（图 2.2-38）。变形过程大致可分两个阶段：①上模下移，毛坯镦粗成桶状，两侧金属被上模劈开，直至与模壁接触，这一阶段变形相近于开式镦粗与开式挤压，以镦粗为主；②毛坯与模壁接触后，上模下方金属继续镦粗，温度逐步降低，镦粗阻力增加，两侧金属继续反挤，向上流动，形成叉部，这一阶段变形相近于闭式镦粗与闭式挤压，以挤压为主。根据上述变形情况，毛坯宽度 B 越大，毛坯中部镦粗的体积越多。因此，根据锻件形状尺寸对毛坯金属分配的要求，劈挤前毛坯尺寸应合理选择。当毛坯凸缘体积较大时（如汽车转向节），劈挤前毛坯应如图 2.2-38a 所示形状，$H = h +$（50～60）mm，$L = H/$（1.4～1.6）mm。同时通过试验选择合式的 B 值。当毛坯凸缘体积较小时（如汽车传动轴突缘叉），劈挤前毛坯应如图 2.2-38b 所示形状，$H = h +$（50～60）mm，$L = l -$（5～10）mm，厚度 B 按体积不变定律计算。

当锻件毛坯两叉股高度不同时，可通过改变上模两侧不同的 α、l、R 值试验得出（图 2.2-39）。

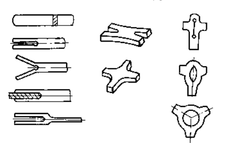
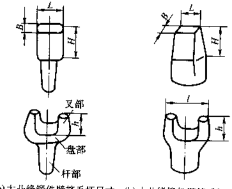


图 2.2-37　劈叉



(a) 大凸缘锻件劈挤毛坯尺寸　(b) 小凸缘锻件劈挤毛坯尺寸

图 2.2-38　劈挤前毛坯形状与尺寸

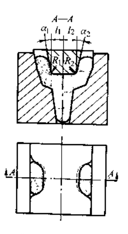


图 2.2-39　劈挤模

3.9 挤压

金属在强烈三向压应力作用下发生剧烈流动的变形方式，称为挤压。

近几年来，胎模锻中开始采用一些较为成熟的挤压方法，同时根据胎模锻特点又发展了一些特有的挤压方法（见表 2.2-8）。

表 2.2-8　胎模锻中挤压方法

挤压方法	简　图	应　用
镦挤	1）开式镦挤	单凸缘、有孔凸缘、轮盘锻件的制坯及成形

续表 2.2-8

挤压方法	简 图	应 用
镦挤	2）闭式镦挤	同开式镦挤部分长轴类锻件镦挤头部
冲挤	1）开式冲挤（冲孔） 2）闭式冲挤	冲孔制坯及扁平环锻件成形 有孔凸缘、套环、轮盘锻件冲连皮孔；杯筒锻件冲不通孔
翻挤		有孔凸缘锻件挤孔
拉挤	毛坯 锻件	杯筒类锻件制坯及成形
劈挤		叉类锻件制坯

3.10 焖形

在胎模中得到锻件最后形状的工序称为焖形，相当于锤上模锻终锻（预锻）工步。它有两种基本方式：开式（有飞边，包括小飞边）焖形；闭式（无飞边）焖形。锤上模锻的终锻以有飞边为主，无飞边甚少采用，而胎模锻焖形则有飞边与无飞边并用。胎模锻有飞边焖形采用合模，小飞边焖形采用垫模，无飞边焖形采用套模。

在大多数情况下，胎模锻采用坯料制坯后焖形的工艺，然而首先分析坯料直接焖形过程却更有利于理解制坯后焖形过程。

（1）坯料直接闭式（无飞边）焖形

坯料直接闭式焖形时，不论锻件形状如何复杂，均可简化为镦粗、镦挤、冷挤变形三种类型；无论哪种类型，其变形过程均可分为开式成形、闭式成形、模合（充满圆角）三个阶段。

1）闭式镦粗焖形（图 2.2-40）

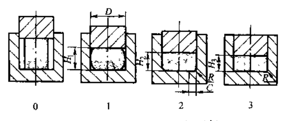


图 2.2-40 闭式镦粗焖形变形过程

第一阶段：开式镦粗，即自由镦粗（0→1）。从上模与坯料接触直至毛坯鼓肚部分与模膛侧壁接触。这一阶段在以锻坯外圆定位的套模焖形中不太显著。

第二阶段：闭式镦粗（1→2）。从毛坯鼓肚与模壁接触直至锻件基本充满模膛（除个别圆角部分 $C>R$）。

第三阶段：充满圆角（2→3）。此时可将圆角充满过程简化为在 90°锥角模套中的挤压，显然 R 愈小，变形愈困难。因此在没有必要时，应尽量增大锻件外圆角 R，以缩短这一阶段。由于金属在胎模中冷却较快，当设备能力不足时，实际上可能无此阶段，即锻件成形在闭式镦粗阶段结束。此时锻件外圆角 $R=C$，即常见的仍是圆角不充满现象。

2）闭式镦挤焖形（图 2.2-41）

第一阶段：开式镦挤（0→1）。

第二阶段：闭式镦挤（1→2）。

第三阶段：充满圆角（2→3）。

闭式镦挤变形力主要取决于断面缩减率$\left(\frac{D^2}{d^2}\right)$。为了降低变形力，改善成形条件，应尽可能减小凸缘直径 D 与凸台直径 d 的比值。

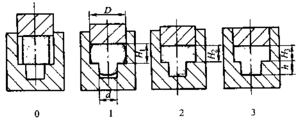


图 2.2-41 闭式镦粗焖形变形阶段

3）闭式冲挤焖形（图 2.2-42）

第一阶段：开式冲挤（0→1）。

第二阶段：闭式冲挤（1→2）。

第三阶段：充满圆角（2→3）。



如前所述，闭式冲挤焖形过程中，断面缩减率 $\left(\frac{D^2}{D^2-d^2}\right)$ 与连皮厚薄 $\left(\frac{d}{h}\right)$ 对变形力影响很大。因此，在没有必要时，应尽量增大壁厚，避免采用过薄的冲孔连皮。实践证明，过薄的冲孔连皮是降低胎模寿命，增加锤击次数和造成锻件充不满的主要原因。

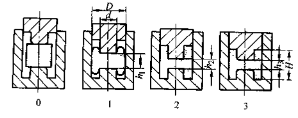


图 2.2-42　闭式冲挤焖形阶段

（2）坯料直接开式（有飞边）焖形

与闭式焖形相似，坯料直接开式焖形变形过程一般可分为：开式（镦粗、镦挤、冲挤）成形、形成飞边及充满模膛、模合（减薄飞边）三个阶段。现以开式镦粗焖形为例（图 2.2-43）加以说明。

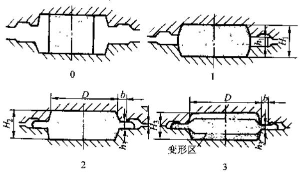


图 2.2-43　开式镦挤焖形变形阶段

第一阶段：开式镦粗（0→1）。自上模与坯料接触直至毛坯鼓肚部分与模具侧壁接触，开始形成飞边。

第二阶段：继续形成飞边及充满模膛（1→2）。闭式焖形时，毛坯与模具侧壁接触后，模膛侧壁对金属继续变形产生阻力；开式焖形时，毛坯与模具侧壁接触后，由飞边对金属继续变形产生横向阻力。其阻力大小主要取决于飞边桥部宽度 b 与高度 h。

在第二阶段结束时，锻件已充满模膛，但存在着未模合现象，即两分模面存在间隙 Δ。此时将多余金属通过飞边桥部流出。可简化假设为金属由变形区横向挤压变形（图 2.2-44）。

第三阶段：飞边进一步减薄，最后模合（2→3）。由于 $h_3<h_2<h_1$，$H_3<H_2<H_1$，第三阶段所需变形力最大，其目的仅是为了挤出多余金属，获得准确的锻件高度方向尺寸，所以理想的开式焖形过程应是金属流入飞边槽的阻力等于金属充满模膛圆角的阻力过程，也就是第二阶段与第三阶段同时结束的过程。

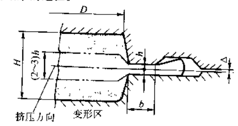


图 2.2-44　金属由飞边桥部挤出的情况

胎模锻焖形时在整个成形过程中由于金属与模壁接触时间长，迅速冷却，特别是飞边部分冷却更快，所以一旦形成飞边，要继续减薄飞边和挤出多余金属就相当困难。因此，当设备能力不足时，经常可以观察到未充满和未模合同时存在的现象。

在这种条件下，胎模飞边槽的作用主要是储存多余金属而不是形成阻力。胎模锻焖形时的有效锤击次数主要是前几锤，应当重击。当飞边出现后，继续锤击对成形无益，面对模具有害。但当设备能力足够，金属变形温度较高时，胎模飞边槽的作用与锤模飞边槽的作用相近，即形成充满模膛的必需的阻力与储存多余金属。

3.11　冲切

采用剪切变形分离金属的工序，称为冲切。在胎模锻中常用的冲切形式有：单面冲孔（冲切孔）、冲形、切飞边与冲连皮。这些变形与板料冲压中的落料、冲孔基本相同。

（1）单面冲孔（图 2.2-45）

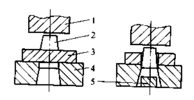


图 2.2-45　单面冲孔

1—上砧；2—冲头；3—毛坯；4—垫环；5—芯料

单面冲孔又称冲切孔或漏孔。将扁毛坯放在垫环上，用冲头将毛坯冲穿。这种冲孔方法需要合适的工具，芯料损失多，但毛坯变形小，孔壁光洁，生产率较高。适用于扁平坏锻件制孔（$H<0.125D$）及套料锻造。

（2）冲形

冲形是指采用专用工具对扁平毛坯进行的封闭或不封闭的定型冲切（图 2.2-46）。有些锻件采用这种方法制坯或成形，它的特点是能用简单的模具得到复杂外形的锻坯或锻件。

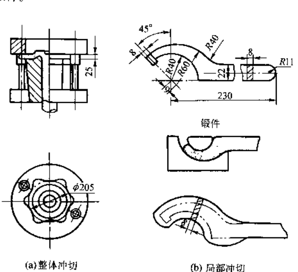


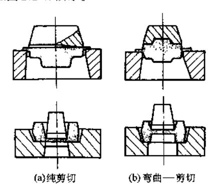
图 2.2-46　冲切方法

（3）切飞边与冲连皮

将锻件焖形所产生的外廓飞边和内孔飞边（连皮）切除的变形工序称为切飞边与冲连皮，是胎模锻中重要的修整工序。



切飞边与冲连皮的变形本质都是剪切，但根据锻件形状特征，又可分为纯剪切（上下模均为工作部分）与弯曲—剪切（上模或下模只有一个是工作部分，另一个起推入或支持作用），如图 2.2-47 所示。



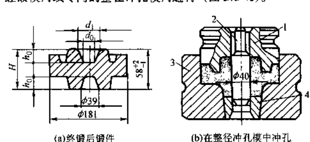
(a)纯剪切　(b)弯曲—剪切

图 2.2-47 切边冲孔方式

切边冲孔中的主要工艺参数是：冲切温度（热切、冷切）与上下模间隙。较大锻件一般采用热切（利用锻后余热或在炉门口烤到紫红色），小型锻件和垫模锻件多采用冷切。由于冲切模比较简单，经常采用锤上冲切，因此上下模间隙较难准确控制，冲切质量不太高。

(4) 整径冲孔

焖形（包括闭式和开式）的有孔锻件，如用固定冲头所成形的孔有较大的出模斜度（常在7°以上），所以常用整径冲孔法得到无斜度的内孔。整径冲孔与锻造在同一火内完成，不需重新加热。为了防止锻件在冲孔时变形，一般都在经锻模内或专门的整径冲孔模内进行（图 2.2-48）。



(a)终锻后锻件　(b)在整径冲孔模中冲孔

图 2.2-48 整径冲孔

1—上模；2—冲头；3—整径冲孔外套；4—冲孔下垫

整径冲孔时常产生的缺陷是孔的下端面出现带肉或毛刺现象，根据某厂经验采用以下措施后基本解决。

1）冲孔时下凹孔的深度 h_0 是主要因素（图 2.2-48a），凹孔太浅就会在冲孔时出现带肉现象。按经验，$\frac{h_0}{d_{平均}}$应大于0.4，（上下凹孔相等时），其中 $d_{平均}=\frac{d_1+d_0}{2}$ 如锻件高度 H 较小时，为保证冲头下面凹孔的深度不致过小，可使上凹孔 $\frac{h_0}{d_{平均}}$大于 0.4，然后翻转 180°冲出透孔。

2）冲头与上模，冲孔下垫与外套之间应有 0.4～0.5 mm 的间隙。为防止冲头和下垫因温度升高而变形，应多做几个浸在水中，以便轮换使用。冲头和下垫尺寸公差按冲孔模设计。

4 胎模设计

胎模工艺灵活机动，可以局部变形，也可整体成形。因此胎模结构也相应很简单但又变化多样，既可作制坯用，又可作为成形使用。胎模设计的任务就是为了解决这些模具的型槽及其外部形状与尺寸，使模具轻巧耐用而又操作方便，既能保证得到图纸要求的锻件产品，又能最大限度地减轻锻工体力劳动。

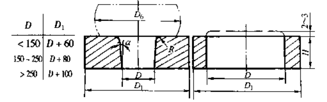
根据模具的主要用途大致可分制坯整形模、成形模及切边冲孔模三大类。

4.1 制坯整形模

胎模锻件一般都经制坯，使用的模具简便而形式多，通用性也强，下面介绍的只是常见的几种。

(1) 漏盘

这是胎模中结构最为简单的通用模具，主要用于带杆法兰件的局部镦粗或镦挤凸台制坯，也可作圆饼、环筒形等短轴旋转体工件的镦粗成形模具（见图 2.2-49）。



D	D_1
<150	$D+60$
150～250	$D+80$
>250	$D+100$

图 2.2-49 漏盘结构尺寸

漏盘外径在孔径基础上加放 60～100 mm，需比工件的突缘部分外径略大，即 $D_1=D+(60-100)>D_0$，这样既能保证模具强度又不致在镦粗突缘时金属流出模外。漏盘的入口圆弧半径 R 应与锻件相适应，孔壁设斜度 $\alpha=1°～3°$。模高与杆部一致或加高，使用时放入适当厚度的垫块，这样可增加模具强度及通用性。作镦粗成形用时，内孔为直壁。为了充填良好，漏盘应较工件高度低 2～3 mm。

(2) 摔子

摔子是胎模中最常见的，主要用于旋转体毛坯的局部拔细、卡槽、滚圆等制坯工序（图 2.2-50），使金属沿轴向得到合理分配。此外也作锻后整形校直使用。由于摔模多由锻工自行在扁方铁上热反印制造，因此外形不如机加工的规矩。

摔子孔径 D 与工件的制坯要求相适应，高度 $H=0.5D+(25～30)$ mm>35 mm，模宽 $D=2H$。长度 L 按工作需要决定：对拔细摔模，为有利金属的轴向流动，L 不宜过长，一般取 $L=B$；卡槽时按实际槽宽确定；对滚圆及整形摔模，$L=L_1+D+L_2$，其中 $L_1\approx L_2\approx 20～40$ mm，以保证锻件的同轴度及垂直度。

摔模工作时，工件需不断转动，设计合理与否主要在于是否操作方便，即不卡模、不“夹肉”。这时除要求模具型槽表面光洁外，并希望开口处以圆弧过渡。制坯时金属变形量大，连接应圆滑，一般取 $R=10～20$ mm，$\alpha\approx 90°$，型槽呈椭圆形；整形时则相反，为使型槽与金属的接触面尽量扩大，取 $R=5～10$ mm，$\alpha=120°$。型槽转角 $r=5～10$ mm。

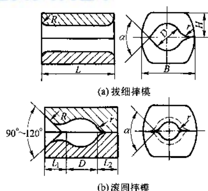
以上各结构参数，当工件大时都取上限值。

(3) 扣模

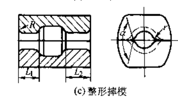
主要用于非旋转体工件终锻前的截面变形，使金属沿中心线方向得到合理分配，或进行弯曲以改变中心线方向以及局部扣形等的制坯工序。有时也作为简单形状工件的终锻成形使用。

扣模在结构上分开口及闭口两种。开口扣模多用于工件的局部变形（见图 2.2-51a、b、c）和对外形要求不严格的工件成形（见图 2.2-51d）。反之则用闭口扣模（见图 2.2-51e、f）。

此外，根据变形受力状态又有无导向及有导向两种形式。当工件外形简单，对称时可不需定位。相反，当形状复杂、变形量大、出现水平错移力时，则应在工艺上加以考虑或扣模上设计导向装置。



(a) 拔细摔模



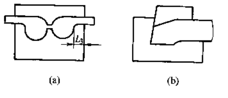
(b) 滚圆摔模

(c) 整形摔模

图 2.2-50　摔模结构尺寸

对于开口扣模，工件可以对称排列（见图 2.2-51a）；可以单边自导（见图 2.2-51b）；必要时可设计成导锁形式（见图 2.2-51c）。

对于闭口扣模，可以设计导锁，也可利用两端侧面自导（见图 2.2-51f），后者结构简单、可靠耐用。



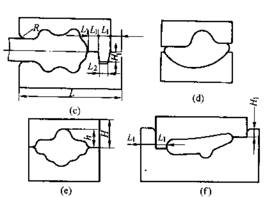


图 2.2-51　扣模结构尺寸

扣模多作为合模成形前的制坯使用，因此其型腔与锻件轮廓相似。为了制坯后易于放入合模型槽，要求每边缩小 1～3 mm，或仅在局部形状复杂处缩小。当它作为最后成形使用时，其型槽应根据锻件尺寸再加放冷缩率。

扣模高度 H 与模腔最大深度 h 有关，为了保证强度，要求不低于 40 mm，即：

$$H = (1.8 \sim 2)\ h > 40\ \text{mm}$$

模具较长时，H 取上限值。若 h 不大，还可略为放高。

为使金属在变形时不外流、操作方便，扣模宽度 B 应比工件扣形后的尺寸 B_1 大，取

$$B = B_1 + (20 \sim 40)\ \text{mm}$$

关于导向尺寸 L_1、L_2 及 H_1，当 $h \leqslant 50$ mm 时

$$L_1 = H_1 = 12 \sim 25\ \text{mm}$$

设导锁时

$$L_2 = L_1 - (3 \sim 6)\ \text{mm（即斜度} \geqslant 7°)$$

开口扣模的口部尺寸 L_3 及 R 依需要而定，一般

$$L_3 = 20 \sim 40\ \text{mm}$$

$$R = 10 \sim 15\ \text{mm}$$

这样，叠加各部分长度的总和即为模具长度 L。

上下扣模之单边间隙为 1～1.5 mm。

4.2　成形模

胎模生产中，作为终锻成形使用的主要为筒模及合模两大类。筒模多用于旋转体工件，而非旋转体工件一般选用合模。

成形模受力大，磨损严重，为了安全生产及操作灵活，模具尺寸既需保证强度又要轻便。下面介绍的结构尺寸是在普通工作条件下由实践统计得来的，当锻件高径比过大、过小或大锤干小活时，则还需适当加以放大。

（1）套筒模

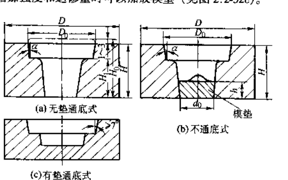
这是一种用得最广泛的胎模形式，特别适宜旋转体或近似旋转体工件进行镦粗、局部镦粗以及镦挤等工序。使用这种模具不仅能生产短轴锻件，也能生产长轴锻件，而且制造及返修容易，操作简便，结构上变化多。为了提高模具寿命或径向成形要求，也可设计成组合形式。

1）开式套筒模　当锻件的端面为平面并可用砧块直接锤击成形时多采用这种形式。

开式模一般是通底整体式，没有垫块，侧壁设斜度 α，锻后工件从孔中顶出（见图 2.2-52a）。

当锻件不高、外形简单，侧壁设较大斜度（$\geqslant 7°$），以及设备吨位有余时，工件能在2～3次锤击下成形并自动跳出，这时也可不通底。因此有将这种形式模具称为“跳模”的（见图 2.2-52b）。

当锻件下端而有形状要求及为了一模多用或模具太薄为了增加强度和返修量时可以加放模垫（见图 2.2-52c）。



(a) 无垫通底式

(b) 不通底式

(c) 有垫通底式

图 2.2-52　开式套筒模结构尺寸

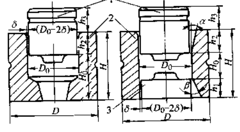
锻件上端而有浅槽需在成形时压出，则可另放压块。

开式筒模的结构尺寸可查表 2.2-9。由于工件是在上砧块直接锤击下成形，考虑欠压及出现飞边，所以端部型槽深度应较锻件相应部位尺寸少 1～3 mm。缺点是锻件的高度尺寸波动较大。

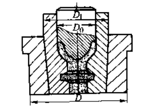
2）闭式套筒模　当锻件上端面有形状要求或增加模具强度时可采用这种形式。为了达到上述目的，可在筒模内加放上冲头（见图 2.2-53a）或冲头与模垫（见图 2.2-53b）。这时筒体内壁呈直线或斜线状，它只起限位的作用。当径向有成形要求又能顺利脱模时，可将凹模设计成组合式从而形成第二个分模面（见图 2.2-53c）。上冲头多为整体结构，对于带孔工件也可设计成带心轴的组合式。以上三种形式都属闭式无飞边胎模锻造。

表 2.2-9 开式筒模（参见图 2.2-50）结构尺寸 mm

锻件最大直径 D_0	模具外径 D	模具高度 H		斜度 α
		无垫式	有垫式	
≤40 41~70 71~100 101~150 151~200 201~250 251~300	D_0+55 D_0+65 D_0+75 D_0+85 D_0+95 D_0+105 D_0+115	$H=H_0-(1\sim3)\geqslant45$ 式中，H_0 为锻件高度	$H=H_0+h-(1\sim3)$ $h=(0.3\sim0.6)\ d_0\geqslant30$ 式中，h 为模垫高度；d_0 为孔径	3°~5°



(a)无垫式 (b)有垫式



(c)结合凹模式

图 2.2-53 闭式筒模结构尺寸
1—冲头；2—筒模；3—下垫

闭式成形时的单位变形抗力较开式大，锻造时间长，模具温升高，因此模具各部分尺寸都应较开式的适当放大。

下模垫高度 $h_1=(0.3\sim0.6)\ D_0\geqslant30$ mm，一般取 40~60 mm。

上冲头高度 $h=h_2+h_3$。

式中，h_2 为上模垫伸入筒体部分的尺寸，它在装入坯料未锻前有不少于 15 mm 的导向，可由作图求得；h_3 为留于套筒外部的尺寸。操作需要夹持时取 30~50 mm，不需夹持时可不留或留 10 mm，以保证翻修。

筒体外径 D 按开式再加放 5~10 mm，其结构尺寸查表 2.2-10。若为可分的组合凹模形式（见图 2.2-53c），选择外形尺寸时，建议 D_1 按 D_0 由表 2.2-9 中查取，D 以 D_1 为锻件最大直径由表 2.2-10 中查取。

表 2.2-10 闭式筒模（见图 2.2-53）结构尺寸 mm

锻件最大直径 D_0	模具外径 D	模具高度 H		单边间隙 δ
		无垫式	有垫式	
≤40 41~70 71~100 101~150 151~200 201~250 251~300	D_0+60 D_0+70 D_0+80 D_0+90 D_0+100 D_0+110 D_0+120	$H=H_0+h_2$ 式中 H_0—锻件高度	$H=h_1+H_0+h_2$	$\delta=0.25\sim0.5$

冲头内的成形型槽较深时，需开顶出孔。为了冲头与模垫的装卸方便，可采用内锥形套筒（见图 2.2-53b 右侧）。一般 $\alpha=1°\sim3°$；$\beta=3°\sim7°$，如要求脱模迅速，可放大至 $\beta=10°\sim30°$。这时只要加工与润滑良好，当套筒上抬就能自动脱落，使生产效率提高也易于实行胎模操作机械化。

3）拉延套筒模 这种胎模适用于薄壁深孔件、大型盲孔件的拉延成形（见图 2.2-54）。它的设计关键在于入口导角 α 及转角半径 R 的正确选定。

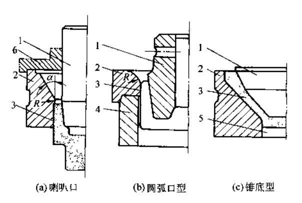
喇叭口型适宜小型深孔件，一般取 $\alpha=30°\sim35°$；$R=50\sim100$ mm，为了不使锻件的中心线偏差超出范围，需要设计定位装置。对于毛坯可在凹模 2 端部车出定位槽；对于冲头 1，若在坯料上不能自动定位，则可在凹模 2 端部加放定位圈 6。

圆弧口型适宜大型浅盲孔件，取 $R\geqslant50$ mm 以利成形。因为尺寸较大，相对偏差就小，所以不考虑冲头定位。

以上两种模具都是通底式，口部内径与锻件 3 外径相同，拉延后锻件从底部漏出。

锥底型适宜锥形筒体成形，孔型尺寸由锻件外形决定，凹模底部需留顶出孔，变形时放置模垫 5。

拉延模的结构与开式筒模类似，由于拉延时的变形力不大，所以其筒体外径尺寸可参考表 2.2-9，成略加以缩小。



(a)喇叭口 (b)圆弧口型 (c)锥底型

图 2.2-54 拉延套筒模结构与尺寸
1—冲头；2—凹模；3—工件；4—支撑筒；5—下模垫；6—冲头定位圈

凹模口部是主要变形区，其余部分仅起支撑作用。因此除小型套筒设计成整体外，大型模具宜将凹模 2 及支撑筒 4 分开成组合式。

冲头 1 的外形与锻件内孔形状相合，其高度以能使锻件漏出口部（直筒形）或贴合凹模（锥筒形）及便于夹持为准。

(2) 合模

合模是一种有飞边槽的开式胎模槽（见图 2.2-55）。它由上模、下模及导向定位装置三部分组成，在模块侧面钻有



抬模孔用来插入或焊上抬棒以便搬动。这种模具结构不受锻件平面形状的限制，通用性较大。特别是对于外形复杂、精度要求高的非旋转体锻件在缺少模锻设备、又无法在筒模内锻造时，都可使用合模进行中小批量的生产。

合模在模具设计方面和筒模有下列几方面的差别。

1）飞边槽　与模锻锤上的锻模一样，合模中也开有飞边槽，以便更好地充满型槽并容纳少量的多余金属，同时兼起缓冲上下模对击作用。合模中采用的飞边槽主要有平面式（见表 2.2-11a）及单面开仓式（见表 2.2-11b）两种。

平面式结构简单，对金属外流阻力大而容纳体积小，适宜外形对称、下料准确的锻件。需要时飞边槽也可只开在下模或不开面将型槽深度作相应减小即可。面单面开仓式与一般锻模结构一样，它有桥部及容积略小的仓部，因此通用性大，使用也多。有时为了切边方便面将其倒置。

2）导向定位装置　合模在工作时不固定于砧块上，为了易于上下模的定位并阻止其受力错移，需要设计导柱、导锁、导套等导向定位元件。

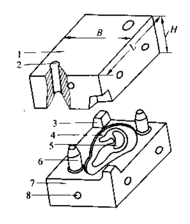


图 2.2-55　合模结构

1—上模；2—销孔；3—导锁；4—飞边槽；5—型槽；6—导柱；7—下模；8—抬模孔

表 2.2-11　飞边槽型式及结构尺寸

mm

飞边槽形式	(a)			(b)					
锻锤吨位/10 kN	h	b	R	h	h_1	b	b_1	R	R_1
0.25～0.33	1.4	15	1.5	1.4	3	8	20	1.5	3.0
0.4～0.75	2.0	20	2.0	2.0	4	10	22	2.0	4.0
1.0～2.0	3.0	25	3.0	3.0	5	12	24	3.0	5.0

① 导柱。导柱细长，强度与刚性都较差，由于加工简单，导向部分高，上模不易跳出，所以当错移力不大时可考虑使用。其结构尺寸见图 2.2-56。

导柱直径 d 可取 $\phi18$、$\phi20$、$\phi22$、$\phi25$、$\phi28$、$\phi30$、$\phi35$、$\phi40$、$\phi45$ mm 等系列尺寸，当模块较高、锻锤吨位偏大时尽量选取大直径规格（见表 2.2-12）。

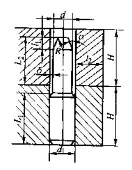


图 2.2-56　导柱结构尺寸

$L_1=H-5$；$L_2\leqslant0.9H$；$L_1=10\sim15$；$l_2=(0.8\sim1.0)\ d_1$；$\delta=0.15\sim0.3$；$R=3\sim5$；$\alpha=7.5°\sim15°$

导柱长度应保证在变形开始时，其圆柱部分已进入上模销孔深度不少于 10～15 mm。它与下模销孔采用压入配合。为减少上下模的错移量及扩大导柱间距，一般多将其布置在模块的对角线上。

② 导锁。导锁防止错移能力强，不易损坏，起模方便，因此虽然模块耗料多，加工麻烦，但仍用得很普遍。其结构尺寸见图 2.2-57。

表 2.2-12　导柱直径选择

模块高度 H/mm	导柱直径 d/mm	适用设备 G/kg
<50	18～20	250
50～80	20～30	560
80～120	30～40	750
>120	40～45	1 000

导锁布置与锻模一样，按错移力大小、方向不同有对角、四角、两侧等几种布置形式。对旋转体锻件可设计环形导锁（见图 2.2-58），若不易出模，则需在导锁上开出缺口。

③ 导柱导锁联用。适合锻件较高情况。这时先以导柱导向、后以导锁定位（见图 2.2-55）。导锁间隙同前，导柱单边间隙可放大至 0.5～0.8 mm。加工时以导锁为基准。

④ 导套。多用于小型胎模上，其结构与筒模的外套相同，壁厚 30～40 mm，单边间隙 0.15～0.3 mm。导套与下模也可以 3°锥面配合，这样能减少锻件的错移量并便于锻件出模。导套也适用于矩形模块，但四角应有 $R12\sim15$ mm 的圆角半径，其余结构同上。

3）模块尺寸与浇口。面尺寸以能合理、紧凑地安排型槽（包括飞边槽）和导向定位装置并保证有必要的壁厚为准（见图 2.2-55）。长宽比 L/B 一般小于 1.6～1.7，很少超过 2。壁厚 S 与型槽最大深度 T 有关，取

$$S=0.5T+(20\sim25)\ \text{mm}$$

模高 H 也与 T 有关

当 $T<50$ mm，　$H=T+(40\sim60)$ mm

当 $T>50$ mm，　$H=T+(50\sim70)$ mm

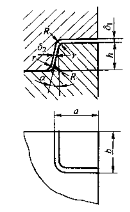


图 2.2-57　导锁结构尺寸

$h=25\sim40$；$\delta_1=1\sim1.5$；$\delta_2=0.1\sim0.5$；
$R=4\sim6$；$r=R+2$；$a=b\geqslant h+5$；$\alpha=3°\sim5°$

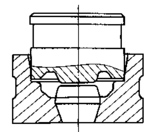


图 2.2-58　环形导锁

模具材料强度高时取下限值。

模块的长、宽、高应有一定的比例，通常情况下可按表 2.2-13 选用。

表 2.2-13　合模模块尺寸

$L\times B/\mathrm{cm}^2$	H/mm	$L\times B/\mathrm{cm}^2$	H/mm
≤200	60 ~ 70	600 ~ 800	90 ~ 100
200 ~ 400	70 ~ 80	800 ~ 1 000	100 ~ 110
400 ~ 600	80 ~ 90	>1 000	110 ~ 120

合模型槽无钳口时，需要设计浇口以便浇注铅型检验。浇口直径为 $\phi20\sim\phi30$ mm，深 10 ~ 20 mm。浇道宽 6 ~ 14 mm，高同飞边的仓部。熔铅麻烦而且有毒，无条件时可用熔融的蜡油拌细砂代替。

4.3　切边冲孔模

胎模锻件的切边冲孔多在锻锤上进行，分冷态与热态二种形式。

冷切劳动条件好，设备利用率高，对于有色金属及低碳结构钢锻件是比较合适的，只要设备能力及生产条件允许应优先考虑，这时模具按冷锻件图设计。当锻件钢材的碳或合金元素含量较高、切边后还需热校正或热弯曲、冷切时设备能力不够等情况时则采用热切，模具设计按热锻件图进行。

锤上切边模结构较简单，一般由凹模与冲头组成（见图 2.2-59a），当锻件上端面为平面时，冲头可由上砧代替（见图 2.2-59b）。

凹模型腔按锻件的分模面设计。刃口部分高度

$$e=h+(3\sim5)\ \mathrm{mm}$$

式中，h 为飞边槽桥部高度，mm。

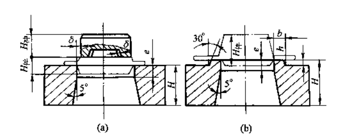


图 2.2-59　常见切边模结构

凹模平面尺寸取决于锻件的最大宽度 B_{max} 和长度 L_{max}，可按表 2.2-14 选用。

表 2.2-14　切边凹模平面尺寸　mm

B_{max} / L_{max}	≤60	60 ~ 90	90 ~ 120	120 ~ 150	150 ~ 200	>200
B	B_{max} + (60 ~ 70)	B_{max} + (70 ~ 80)	B_{max} + (80 ~ 90)	B_{max} + (90 ~ 100)		
L	L_{max} + 70	L_{max} + 80	L_{max} + 90	L_{max} + 100	L_{max} + 110	L_{max} + 120

凹模高度 H 决定于锻件与冲头接触面至底面的尺寸 $H_{件}$ 及冲头高度 $H_{冲}$，为不使切边后将锻件压坏，应保证：

$$H\geqslant H_{件}+H_{冲}，通常\ H_{冲}=20\sim50\ \mathrm{mm}$$

在不用冲头情况下，凹模应比锻件最大高度 H_{max} 为高，可取：

$$H=H_{max}+20\sim40\ \mathrm{mm}>50\ \mathrm{mm}$$

为节约模具材料，凹模不宜太高。若尺寸不够可用垫块及垫圈。批量大时，应设计专用模垫。

冲头与锻件接触表面的形状尺寸应与锻件相适应并可予以简化，在侧面留有间隙。冲头与凹模之间也需有间隙。间隙的数值取 $\delta=1\sim1.5$ mm。

冲头一般利用锻件外形定位，特殊情况下可依靠与凹模配合的冲头定位板进行工作（见图 2.2-60）。无法定位时，与凹模之间的间隙量需放大。

若切边时锻件的飞边仓部朝下，凹模刃口部分上抬形成切边台（见图 2.2-59b），其高度 h_1 及宽度 b 可与飞边的仓部高及桥部宽相同。

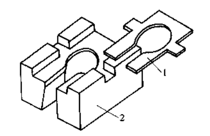


图 2.2-60　带冲头定位板的开式切边凹模

1—冲头定位板；2—开式切边凹模

由于切边在锤上进行，锤头行程难以控制，尤其当锻件分模面以上高度不大或锤吨位较大时更是如此，为避免损坏凹模的刃口可加设保护台，突起高度与仓部高度相一致（见图 2.2-61）。

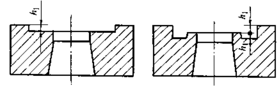


图 2.2-61 带保护台切边凹模

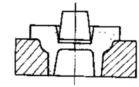


图 2.2-62 冲孔模座

对局部成形的锻件也可设计开口切边模（见图 2.2-60）。

冲除连皮时，刃口开在冲头处，凹模仅起承压作用，只要设计相应的模座即可工作（见图 2.2-62）。若锻件在筒模内成形，可利用原成形模，配合冲头及定位圈。对刚性好的厚锻件可不用任何模座，可用冲头直接冲去连皮。

5 胎模锻设备的选用

胎模锻设备一般选择空气锤、蒸汽锤或蒸汽－空气锤。下面着重介绍设备能力的选择要点及设备吨位计算。

5.1 设备能力的选择要点

正确选择所需设备能力（落下部分重量吨位）是保证胎模锻工艺顺利进行的重要条件。实践证明，设备能力偏小，金属不易充满模膛，火次增多，生产效率降低；相反设备能力偏大，胎模寿命迅速降低，设备动力消耗增大，且不利于安全生产。

生产实践中，设备吨位选择的重点常不在于求出准确的变形力和变形功，而在于掌握胎模锻设备能力选择的特点和影响因素，充分发挥现有设备的作用。

胎模锻用设备能力的选择要点如下。

1）设备能力选择必须考虑胎模类型（如有飞边焖形胎模、无飞边焖形胎模、小飞边焖形胎模、摔模等）和焖形方式（整件焖形与局部焖形、整件锤击与局部锤击、坯料直接焖形与制坯后焖形、一次焖形与切边后重复焖形）。同一锻件因胎模类型和焖形方式不同，所需设备能力区别很大。如某台阶轴整件合模焖形需 3 t 蒸汽－空气自由锻锤，但采用摔模局部型摔成形仅需 400 kg 空气锤。现有锻造设备能力是选择胎模锻工艺方案的先决条件之一。如单凸缘锻件凸台镦挤成形时，设备能力足够可顺利成形，设备能力不足则不宜采用此方案。一般说来，设备能力偏小，锤击次数多，生产效率降低。如某叉杆锻件，在 400 kg 空气锤上合模焖形，锤击达二十多次，在 1 t 空气锤上仅六、七次。设备能力偏大，胎模寿命迅速降低。如图 2.2-63 所示，在合模（有飞边焖形胎模）锻造时，因模面较大（即所谓模面承击）和锻件的缓冲作用，这种影响还不太显著。在套模（无飞边焖形胎模）锻造时，金属充满模膛后（锻件类似不变形刚体），全部锤击能量均消耗在模膛变形上（即所谓模膛承击），造成胎模变形涨大，甚至破裂。

2）设备能力选择必须考虑中小型工厂锻造车间特点。这类车间锻造设备以锤为主，台数不多，吨位级差大，经常要求“小设备干大活”，“一锤多用”。

根据理论分析及实验结果，锻造所需设备吨位可用下列公式计算：

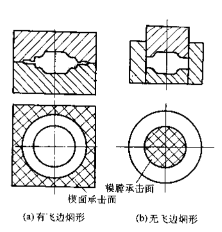


图 2.2-63 胎模承击面

$$G=\frac{\sigma_t Fek}{Hn}$$

式中，G 为锻造所需空气锤或蒸汽锤吨位，kg；σ_t 为金属在变形温度时的强度，10 MPa；F 为锻件变形部分投影面积，mm^2；e 为锻件变形量，mm；k 为变形阻力系数；H 为锤头行程，mm；n 为打击次数。

5.2 设备吨位的计算

有飞边合模，不包括制坯一火焖形时，所需设备吨位可按下式计算：

$$G=KF$$

式中，G 为所需锻锤吨位，kg；F 为锻件焖形部分投影面积，cm^2，计算时不计飞边面积；K 为系数，通常在 5～10 范围内，形状简单、制坯较好的锻件取 5～6；较复杂或局部有筋锻件取 6～7；直接焖形小型锻件取 7～9；扁薄锻件（如变速叉等）取 8～10。

除此，胎模锻设备吨位选择可参考表 2.2-15。选用表 2.2-15 时应注意如下几点。

1）摔模成形所需吨位与型摔中变形部分尺寸及变形程度有关。表 2.2-15 中所给数值为中等和较大变形程度时的变形部分直径与长度。若变形程度较小（如已经过初锻的台阶轴最后用型摔成形或整形）时，可锻直径和长度可以增大。

2）垫模焖形一般均指一火焖形，包括镦粗及挤压成形。

3）套模焖形最大直径系指自由镦粗或简单制坯后一火焖形。有些锻件工艺要求采用预锻，再次加热终锻时亦可采用。表 2.2-15 中较小数值适用于有较大扁平部分或连皮的锻件（如薄幅齿轮）。

4）合模焖形主要指自由镦粗或制坯后一火焖形。表 2.2-15 中数值下限适用于形状简单、制坯良好的锻件；上限适用于直接焖形或形状复杂、有扁薄部分（如变速叉等）的锻件。

5）表 2.2-15 中胎模锻造所给数值系指毛坯直接放入垫模中（先放入拌好机油的锯末）锤击 2～4 次，锻件能自动跳出。较多的锤击次数用于较大的锻件。对于 $\frac{D}{H}<1.5$ 的锻件，所需锻锤吨位应适当增加。有时为了增大锻锤所能锻出的锻件直径，可在毛坯镦粗（镦挤）结束，初现或将现飞边时，将锻件从模镗内取出，二次加入产气的润滑剂（机油与锯末混合物），然后继续重击，则锻件亦可能跳出。例如，曾用此法在 750 kg 空气锤上锻出了 ϕ158 mm 的齿轮毛坯（固定式跳模），但生产率较低。

6）销轴类锻件顶镦所需设备能力与顶墩直径及锻件总长度有关。表 2.2-15 中数值系指下模直接放在下砧上面不

采用特殊下砧的情况。由于锻件总长度较大，故减少了锤击有效行程。为了发挥锻锤能力，采用特殊下砧，能锻制更大的锻件头部直径。如在 4 kN 空气锤上采用专用下砧及拼分式套模，锻出了 ϕ180 mm 的法兰轴锻件。

表 2.2-15　胎模锻造所需设备吨位选择

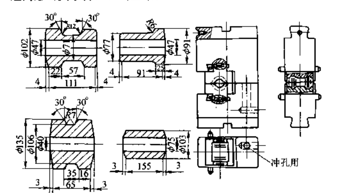
锻造方法	锻件尺寸 /mm	锻锤下落部分重量/kg				
		250	400	560	750	1 000
摔模成形	$D \times L$	60 × 80	80 × 90	90 × 120	100 × 150	120 × 180
垫模焖形	D	120	140	160	180	200
套模焖形	D	80 ~ 100	130 ~ 150	155 ~ 165	175 ~ 185	200 ~ 210

6　自由锻锤固定胎模锻造的特点

(1) 自由锻锤上型砧锻造工艺及模具设计特点

在自由锻锤上利用带有型槽的锤头进行锻造生产的方法称为型砧锻造。此时工具固定在设备上，它相当于模锻锤上模锻的制坯工步，类似于胎模锻中的摔形、扣形、弯曲等工序。型砧既可以用于制坯，也可以进行终锻，但主要用于制坯。

1）型砧直接终锻成形　对于形状特别简单，尺寸变化不大的锻件（如直径相差不大的台阶轴），采用毛坯直接在型砧上终锻的方法可大大提高生产率。图 2.2-64 为型砧锻造的短套类锻件及所用型砧。



(a) 型砧锻短套锻件图　　(b) 锻造短套类锻件用镶体型砧

图 2.2-64　短筒类锻件型砧锻造

2）型砧制坯　在不宜制坯的模锻设备上模锻（如在摩擦压力机上模锻）时，常采用自由锻锤型砧制坯。自由锻锤上固定模模锻时，也经常配备另一台自由锻锤为其进行型砧制坯。型砧制坯的方式如下。

① 局部型砧制坯。当设备吨位不足或模块尺寸不够时采用。图 2.2-65 为连杆锻件局部型砧制坯工步及其型砧。主要是型砧滚压和型砧拔长，型砧滚压模腔的尺寸关系大致为

$$h/H = 0.4 \sim 0.6$$
$$L_1 = (1.0 \sim 1.3)H$$
$$B_0 = (1.1 \sim 1.2)H$$
$$B_1 = (0.8 \sim 1.0)H$$

型砧拔长模膛的尺寸关系大致为

$$B = (1.0 \sim 1.3)D_p$$
$$l = 1(1/4 \sim 1/3)L$$
$$e = d_1 - d_2 + 10$$
$$R = (0.2 \sim 0.4)D_p$$

其中，D_p 为原始坯料直径；d_1、d_2 分别为计算毛坯的最大直径和最小直径。

② 型砧整体制坯。用于批量较大的小型锻件的制坯。如图 2.2-66 所示。

3）型砧结构

① 整体型砧。适用于种类不多、批量较大的锻件制坯，如图 2.2-67 所示。整体型砧结构简单，但模具消耗大。

② 镶块型砧。在锻件种类较多的情况下，为了简化型砧制造、节约模具钢（本体用普通结构钢制造，工作部分用模具钢制成锻块）和便于更换镶块而采用镶块型砧。

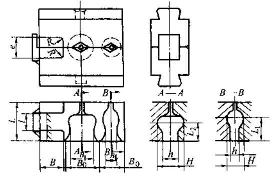


图 2.2-65 局部型砧制坯

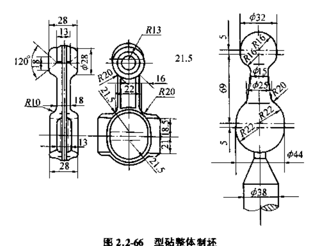


图 2.2-66 型砧整体制坯

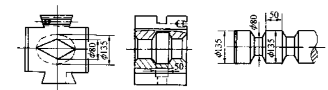


图 2.2-67 整体型砧

(2) 固定模结构、紧固与导向

1) 自由锻锤上固定模模锻应采取的措施与模锻锤相比，自由锻锤的刚性差，锤头导向长度较短，导轨间隙大，砧座重量轻，打击时跳动幅度大，等等，因此在自由锻锤上进行固定模锻时，锻件易产生错移、锻不足等缺陷。为了使自由锻锤适应固定模模锻，应采用如下一些措施。

① 必须在模具上设置导向定位装置（一般为导锁），以提高导向准确性，防止打击时错移，克服自由锻锤导轨短导向性差的缺点。

② 设计模具时应使模膛中心尽量与锤杆中心一致，以防止偏心打击。

③ 选用锻锤时，吨位应适当偏大一些，以减少砧座跳动过大而造成锻不足的现象。

④ 采用与模锻锤上相同的紧固方法，即采用定位键，以防止锻模沿燕尾槽方向移动，采用斜楔，工作时安全可靠。

⑤ 加强锤的维护管理，保证锤的使用精度，如发现砧座偏斜，导轨磨损等应及时维修。

2) 固定模结构

① 整体式固定模 整体式固定模常用于如下情况：

a) 当锻件尺寸较大，采用镶块模砧而尺寸不够时；

b) 利用原胎模锻造使用的合模经加工出燕尾后而作为固定模使用时；

c) 当锻件分模面水平落差较大而无法采用镶块模时（因为此时采用镶块模导向装置不可靠）；

d) 偶然生产一批模锻件而无现成模体供选用时。

整体固定模可用斜楔、定位键直接固定在锤头和下砧座上，也可以通过上下接模固定，如图 2.2-68 所示。

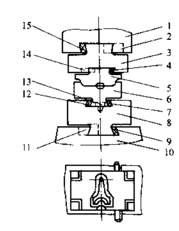
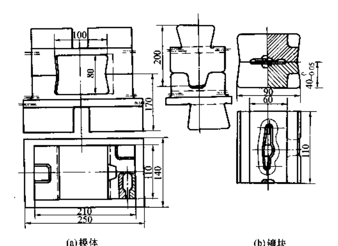


图 2.2-68 整体式固定模

1—锤头；2、11、14—定位键；3—上接模；
4、9、15—斜楔；5—上模；6—下模；
7、12—调整楔；8—下接模；10—砧座；13—下模定位销

② 镶块式而定模（图 2.2-69）。镶块式固定模使用最为普遍，因为节约模具材料，缩短加工周期。



(a) 模体 (b) 镶块

图 2.2-69 镶块式固定模

7 胎模锻实例

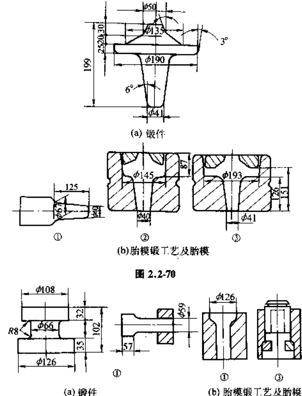
胎模的结构比模锻设备所用锻模的结构简单，但胎模工艺灵活，种类繁多，故本节举例，略去锻件的工艺计算和胎模设计过程，只列举一些典型锻件的胎模锻工艺过程和相应的胎模结构，以此掌握各类胎模的选用和结构设计。

例 1 单法兰锻件——阀体胎模锻（图 2.2-70）

锻件材料：45 钢；锻件重量：9.5 kg；坯料尺寸：ϕ100 mm×162 mm；设备：1 t 锤；火次：三火；工序：①拔长一端并摔光，②套模预锻，③套模终锻。

例 2 双法兰锻件——例挡齿轮胎模锻（图 2.2-71）





(a) 锻件

(b)胎模锻工艺及胎模

图 2.2-70

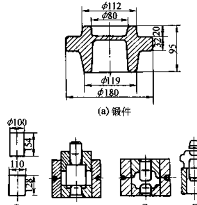
(a) 锻件　　(b) 胎模锻工艺及胎模

图 2.2-71　阀体锻件及其胎模

锻件材料：18CrMnTi；锻件重量：6.6 kg；坯料尺寸：ϕ100 mm × 116 mm；设备：560 kg 空气锤；工序：①拔长，②镦粗小端凸缘，③镦粗大端凸缘。

例 3　有孔法兰锻件——齿轮胎模锻（图 2.2-72）

锻件材料：45 钢；锻件重量：8.86 kg；坯料尺寸：ϕ100 mm × 154 mm；设备：1 t 蒸汽-空气锤；火次：一火；工序：①镦粗，②在套模中用活动冲头挤压成形，③冲切连皮。



(a) 锻件

(b)胎模锻工艺及胎模

图 2.2-72　后半轴套管胎模锻

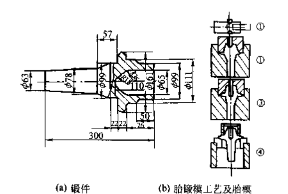
例 4　杆筒锻件——后半轴套管胎模锻（图 2.2-73）

锻件材料：45 钢；锻件重量：13.5 kg；坯料尺寸：ϕ100 mm × 236 mm；设备：1 t 蒸汽锤；火次：两火；工序：①拔长并摔光杆部，②预冲挤，③终冲挤，④切边。

例 5　轮盘锻件——常啮合齿轮胎模锻（图 2.2-74）

锻件材料：18CrMnTi；锻件重量：6.2 kg；坯料尺寸：ϕ130 mm × 61 mm；设备：1 t 蒸汽锤；火次：一火；工序：①在下模垫上镦挤，②套模焖形，③冲切连皮。

例 6　直杆锻件——连杆胎模锻（图 2.2-75）



(a) 锻件　　(b) 胎锻模工艺及胎模

图 2.2-73　后半轴套管胎模锻

ϕ184
ϕ65
16
36
61
10
ϕ40
ϕ70
ϕ140
模套
下模垫
镶块
模套
①
②
③

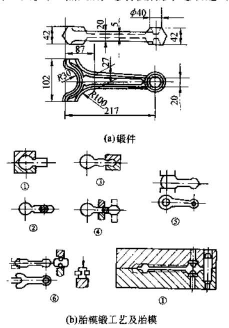
(a) 锻件　　(b) 胎锻模工艺及胎膜

图 2.2-74　常啮合齿轮锻件及其胎模

锻件材料：45 钢；锻件重量：2.1 kg；坯料尺寸：ϕ60 mm × 105 mm；设备：750 kg 空气锤；火次：三火；工序：①球摔摔大头，②初拔杆部，③球摔摔小头，④拔杆并打扁小头，⑤打扁大头，⑥劈开大头并校准叉口，⑦合模焖形，⑧切边（图略）。

例 7　弯杆锻件——吊钩胎模锻（图 2.2-76）

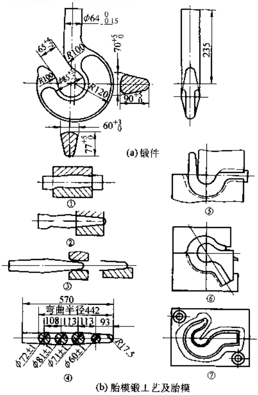
锻件材料：20 钢；锻件重量：15.5 kg；坯料尺寸：ϕ90 mm × 360 mm；火次：三火；工序：[第一火]（250 kg 空气锤）①拔中部，②拔杆部，③拔尖、滚圆，④中间毛坯尺寸；[第二火]（30 kN 摩擦压力机）⑤第一次弯曲，⑥第二次弯曲，[第三火]（3 t 蒸汽锤）⑦合模焖形，⑧切边（图略）。



(a)锻件

(b)胎模锻工艺及胎模

图 2.2-75　连杆锻件及其胎模



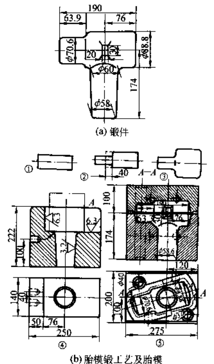
(a) 锻件

(b) 胎模锻工艺及胎模

图 2.2-76　吊勾锻件及其胎模

例 8　枝杆锻件——阀体胎模锻（图 2.2-77）

锻件材料：45 钢；锻件重量：11 kg；坯料尺寸：ϕ110 mm×168 mm；设备：1 t 蒸汽锤；火次：两火；工序：①坯料，②拔长一端并摔光，③拍扁另一端，④偏心镦头，⑤合模焖形，⑥切边（图略）。



(a) 锻件

(b) 胎模锻工艺及胎模

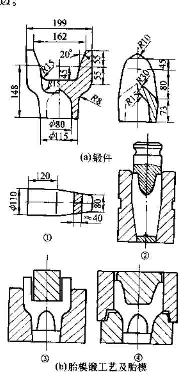
图 2.2-77　阀体锻件及其胎模

例 9　叉类锻件——万向联轴器叉胎模锻（图 2.2-78）

锻件材料：45 钢；坯料尺寸：ϕ110 mm×170 mm；设备：560 kg 空气锤；火次：一火；工序：①拔杆、拍扁；②劈挤叉部；③预冲挤；④终成形。

例 10　多枝体锻件——阀座胎模锻（图 2.2-79）

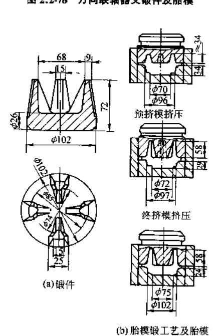
锻件材料：20 钢；设备：1 t 蒸汽锤；火次：三火；工序：①镦粗并滚圆，②用预挤模挤压（爪高 34 mm），③切边，④用终挤模挤压（爪高 58 mm），⑤切边，⑥用终挤模再挤，⑦切边。



(a) 锻件

(b) 胎模锻工艺及胎模

图 2.2-78　万向联轴器叉锻件及胎模



(a) 锻件

(b) 胎模锻工艺及胎模

图 2.2-79　阀座锻件及胎模

编写：夏巨谌（华中科技大学）



第3章　锤类设备上模锻

1　模锻锻上模锻特点及应用范围

模锻锤上模锻的优点是设备结构简单、造价低、生产效率高和工艺适应性广。模锻锤的打击能量可以在操作中控制，根据不同的工步要求可以使用不同的打击能量，能满足各种制坯工步的要求。在每个型槽中可以进行多次打击，能获得较大的变形量。模块可进行多次翻新，模具成本比较低。

锤上模锻一般采用开式模锻，利用模锻锤打击能量可以控制的设备特点，锤锻模上可以布排多个型槽，不需配置额外的制坯设备，在一套锻模上能完成制坯（如镦粗、拔长、滚压、压弯、压扁、卡压等）、预锻和终锻等工步。因此模锻锤在工艺上具有广泛的适用性，能够完成汽车、摩托车、机车、汽轮机上多种锻件的模锻成形，如连杆、曲轴、前轴、转向节、转向臂、齿轮、轴、叶片、拖钩、叉类件等锻件。

模锻锤上模锻的缺点是：没有顶出机构；噪声大，劳动条件差；需配备蒸汽或压缩空气，能源利用率低；由于有制坯工步，对操作人员要求较高。由于没有顶出机构，模锻锤不适合生产深型槽锻件，对普通锻件也需要有较大的模锻斜度，增大了锻件的加工余量。

针对模锻锤的缺点，近年来对它的改进研究在不断进行，特别是电液锤的推广应用为模锻锤带来了新的生机。电液锤继承了模锻锤的优点，且配置了顶料机构，每次打击能量可以用程序控制。电液锤在设备精度和性能以及节能和改善劳动条件等方面都较模锻锤有很大改进。特别是大幅度提高能源利用率，有效的消除了蒸汽-空气模锻锤的缺点。目前国内已具备把现有的模锻锤以较低的成本改造成电液锤的技术能力，这也是模锻锤今后的发展方向。

2　锻件分类及模锻工步选择

按照锻件的形状，模锻锤上的锻件可分为圆饼类、法兰类、直轴类、弯曲轴线类、叉形类和枝芽类。下面将针对各类锻件的通常形状特点进行模锻工艺分析，确定模锻工步。

（1）圆饼类

圆饼类锻件的形状特点是在分模线上的投影为圆形或者长度和宽度尺寸相差不大，高度尺寸相对于外径或长度尺寸较小。汽车上的很多齿轮、同步锥、十字轴等都属于圆饼类锻件。

1）此类锻件可在模锻锤上采用镦粗—预锻—终锻的工艺方法生产，前提是模块尺寸满足型槽排布。如图 2.3-1 所示。尺寸较大的圆饼类锻件可用两台设备联合锻造。

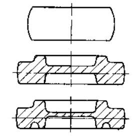


图 2.3-1　（圆饼类锻件）镦粗—预锻—终锻

2）有些简单的锻件可以不用预锻，直接镦粗—终锻，如图 2.3-2 所示。这种工艺方法减小模块尺寸、降低模具成本费用，在实际生产中应用广泛。

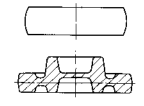


图 2.3-2　（圆饼类锻件）镦粗—终锻

（2）法兰类

法兰类锻件由法兰和凸台组成，法兰一般扁薄，呈圆形或近似圆形，凸台可在法兰的一侧或两侧。

当凸台高度不大时，法兰类锻件可以参照圆饼类锻件的工艺，采用镦粗—预锻—终锻的工艺方法模锻。根据模锻锤的特点，将凸台放在上模，有利于锻件凸台充满，如图 2.3-3所示。

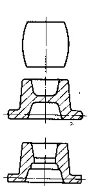


图 2.3-3　（法兰类锻件）镦粗—预锻—终锻

（3）直轴类

直轴类锻件的基本特点是具有直长的轴线，此类锻件一般采用制坯—预锻—终锻的工艺方法生产。根据模锻锤的特点，可以在同一模块上进行拔长和滚压等型槽完成制坯。

1）形状简单的锻件可以不用预锻，工步设计为拔长、滚压、终锻，如图 2.3-4 所示。

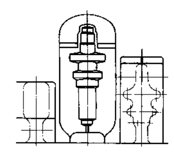


图 2.3-4　（直轴类锻件）拔长—滚压—终锻

2）对于沿轴线截面变化不大的锻件可以不用拔长，但必须设计滚压型槽去除氧化皮，工步设计为滚压、终锻，如图 2.3-5 所示。

3）对于杆部特别长的锻件如变速操纵杆，就必须另设一台辊锻机来完成杆部拔长，工步设计为滚压、终锻、辊锻拔长，如图 2.3-6 所示。

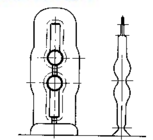


图 2.3-5 （直轴类锻件）滚压—终锻

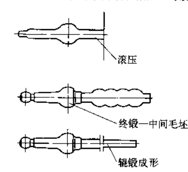


图 2.3-6 （直轴类锻件）滚压、终锻、辊锻拔长

轴类锻件中的各种阶梯轴，除可采用上述方法模锻外，适合在楔横轧机上轧制。采用楔横轧机工艺锻制阶梯轴，与采用一般锻造工艺相比，具有以下特点：①锻件精度高；② 生产效率高；③材料利用率高，可达 95%以上。

(4) 弯曲轴线类

弯曲轴线类锻件的基本特点是具有弯曲的长轴线，此类锻件通常的锻造工艺为拔长—压弯—预锻—终锻或滚压—压弯—终锻。如图 2.3-7 所示。

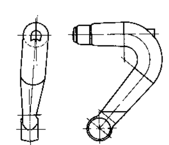


图 2.3-7 弯曲轴线类锻件

其制坯工步与直轴线类锻件的制坯相同，可以在模锻设备上或专用制坯设备上进行。压弯工步一般在模锻设备上进行，当锻件轴线在水平方向上没有弯曲或弯曲很小时，可以不用压弯工步。如图 2.3-8 所示。

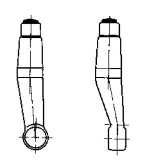


图 2.3-8 弯曲很小的锻件

(5) 叉形锻件

叉形锻件的形状特点是锻件一端带有叉口另一端带有或长或短的杆部。根据杆部的长短叉形锻件又可分为长杆叉形锻件和短杆叉形锻件。有两种工艺方案。

1) 叉口平放分模，模锻工艺为制坯—预锻—终锻。制坯可根据锻件截面变化情况选用镦粗、拔长（辊锻）、压扁等工步，预锻一般要带有劈开台。如图 2.3-9 所示。

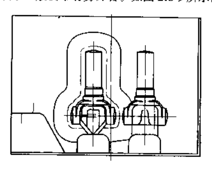


图 2.3-9 长杆叉形锻件

2) 短杆叉形锻件可以采用弯曲轴线类锻件的模锻工艺，即制坯—压弯—终锻。如图 2.3-10 所示。

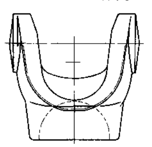


图 2.3-10 短杆叉形锻件

汽车上的转向节、变速叉、滑动叉等都属于叉形锻件。

(6) 枝芽类锻件

枝芽类锻件在直杆上带有凸出的部分，一般采用不对称制坯—预锻—终锻的工艺方法模锻。不对称制坯的目的是为枝芽凸出部分准备好坯料，在模锻锤上可通过拔长—不对称滚压完成，如图 2.3-11 所示。

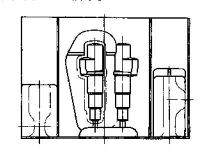


图 2.3-11 枝芽类锻件

(7) 其他

有些锻件与上述各种锻件的形状十分相似，只是局部形状有微小变化，这些锻件可参照相应类型的锻件选择合适的模锻工艺。

一些锻件形状比较复杂，为了便于金属充满型槽和锻件出模以及简化模具结构，可以把锻件形状简化，分步完成。先用简单的模锻方法锻出锻件的主要形状作为中间毛坯，模锻后增加压弯、辊锻和翻边等工步，完成锻件最终成形。

汽车前吊环采用先模锻后压弯的工艺方法生产，如图 2.3-12 所示。



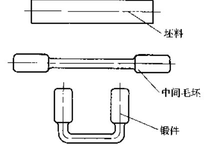


图 2.3-12　吊环的模锻—压弯工艺过程

3　模锻锤上模锻工艺规程的制订

制订模锻工艺规程包括设计锻件图、坯料计算、确定模锻锤吨位和制订工艺文件。

3.1　锻件图的设计

锻件图是制订模锻工艺、设计和制造锻模，以及锻件生产管理和最终检验的基本依据。设计锻件图包括确定锻件分模线形状、机械加工余量、选定锻件公差、模锻斜度和圆角半径，确定冲孔连皮，给定附加的技术要求等。

（1）确定分模线形状

分模线形状分为三类：平面分模线，如图 2.3-13a 所示；对称弯曲分模线，如图 2.3-13b 所示；不对称弯曲分模线，如图 2.3-13c 所示。

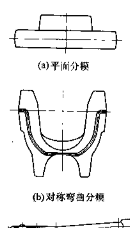
确定分模线要遵循下列基本原则。

1）分模线确定在具有最大投影尺寸的位置上，以保证锻件顺利出模。

2）尽量采用镦粗成形，以利于金属充满型槽。

3）力求减少余块，使锻件形状尽量与零件形状相近。

4）尽量使用平直分模线和对称弯曲分模线，以简化模具导面结构，便于模具加工。



(c)不对称弯曲分模

图 2.3-13　分模线形状的三种类型

（2）确定机械加工余量

锻件上所有需要进行机械加工的部位，都要给出一定的加工余量。余量的大小根据锻件的质量大小、形状复杂程度和零件表面粗糙度确定。余量过大，会增加锻件的切削加工量和金属的损耗；余量过小，会引起加工量不足，而增加废品。因此，确定合理的加工余量十分重要。

在模锻锤设备上生产的模锻件，其机械加工余量可参照 GB/T 12362—1990《钢质模锻件公差及机械加工余量》的规定进行设计。

表 2.3-1 和表 2.3-2 是 GB/T 12362—1990 中关于锻件内外表面加工余量和锻件内孔单面加工余量的具体规定。

表 2.3-1　锻件内外表面加工余量（摘自 GB/T 12362—1990）

锻件重量/kg		零件表面粗糙度/μm		形状复杂系数 S_1，S_2，S_3，S_4	单边余量/mm							
					厚度方向	水平方向						
						大于 0 至 315	315 400	400 630	630 800	800 1 250	1 250 1 600	1 600 2 500
大于	至	≥1.6	<1.6									
0	0.4				1.0~1.5	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	—	—	—	—
0.4	1.0				1.5~2.0	1.5~2.0	1.5~2.0	2.0~2.5	2.0~3.0	—	—	—
1.0	1.8				1.5~2.0	1.5~2.0	1.5~2.0	2.0~2.7	2.0~3.0	—	—	—
1.8	3.2				1.7~2.2	1.7~2.2	2.0~2.5	2.0~2.7	2.0~3.0	2.5~3.5	—	—
3.2	5.6				1.7~2.2	1.7~2.2	2.0~2.5	2.0~2.7	2.5~3.5	2.5~4.0	—	—
5.6	10.0				2.0~2.5	2.0~2.5	2.0~2.5	2.3~3.0	2.5~3.5	2.7~4.0	3.0~4.5	—
10.0	20.0				2.0~2.5	2.0~2.5	2.0~2.7	2.3~3.0	2.5~3.5	2.7~4.0	3.0~4.5	—
20.0	50.0				2.3~3.0	2.5~3.0	2.5~3.0	2.5~3.5	2.7~4.0	3.0~4.5	3.5~4.5	—
50.0	120.0				2.5~3.2	2.5~3.5	2.5~3.5	2.5~3.5	2.7~4.0	3.0~4.5	3.5~4.5	4.0~5.5
120.0	250.0				3.0~4.0	2.5~3.5	2.5~3.5	2.7~4.0	3.0~4.5	3.0~4.5	3.5~5.0	4.0~5.5
					3.5~4.5	2.7~3.5	2.7~3.5	3.0~4.0	3.0~4.5	3.5~5.0	4.0~5.0	4.5~6.0
					4.0~5.5	2.7~4.0	3.0~4.0	3.0~4.5	3.5~4.5	3.5~5.0	4.0~5.5	4.5~6.0

例：当锻件重量为 3 kg，零件表面粗糙度 R_a=3.2 μm，形状复杂系数为 S_3，长度为 480 mm 时查出该锻件余量是：厚度方向为 1.7~2.2 mm；水平方向为 2.0~2.7 mm。



表 2.3-2　锻件内孔直径的单面机械加工余量（摘自 GB/T 12362—1990）

孔深/mm 余量/mm 孔径/mm	0～63	63～100	100～140	140～200	200～280
25	2.0				
25～40	2.0	2.6			
40～63	2.0	2.6	3.0		
63～100	2.5	3.0	3.0	4.0	
100～160	2.6	3.0	3.4	4.0	4.6
160～250	3.0	3.0	3.4	4.0	4.6

表 2.3-3　模锻锤、热模锻压力机、螺旋压力机锻件外模锻斜度 α 数值（摘自 GB/T 12361—1990）

H/B α/(°) L/B	≤1	1～3	3～4.5	4.5～6.5	>6.5
≤1.5	5	7	10	12	15
25～40	5	5	7	10	12

表 2.3-1 的使用方法如下。

首先按锻件质量选定相应范围，然后沿水平线向右移动，若零件表面粗糙度 $R_a \geq 1.6\ \mu m$，则沿同一水平线继续向右移动，若零件表面粗糙度 $R_a < 1.6\ \mu m$，则沿倾斜线向右下移动到 $R_a < 1.6\ \mu m$ 垂线的交点，对于形状复杂系数，则用同样的方法，沿水平线或倾斜线移动到 S_1 或 S_2、S_3 和 S_4 格的位置，然后沿水平线右移，即可查得相应的厚度方向和水平方向的余量值。

表 2.3-1 和表 2.3-2 中的形状复杂系数 S 是指锻件质量 m_1 与相应的锻件外廓包容体质量 m_2 的比值，即 $S = m_1/m_2$。根据 S 值的大小，锻件的形状复杂系数分为四级：

S_1 级 $0.63 < S \leq 1$　　简单件

S_2 级 $0.32 < S \leq 0.63$　　一般件

S_3 级 $0.16 < S \leq 0.32$　　较复杂件

S_4 级 $0 < S \leq 0.16$　　复杂件

形状复杂系数有以下特例：

当锻件形状为薄形圆盘或法兰件且圆盘厚度和直径之比 $t/d \leq 0.2$ 时，采用 S_4 级。如图 2.3-14 所示。



图 2.3-14　薄形圆盘示意图

对于需要附加工序的锻件和在专用锻造设备上生产的锻件，其加工余量可由供需双方商定或根据设备所能达到的精度给定，如 AMP70 多工位热镦机生产的锻件，其余量可按 0.7～1.2 mm 设计，比 GB/T 12362—1990 规定的要小。

锻件图一般用双点划线表示出零件加工后的形状，根据双点划线与锻件轮廓线的对比，能够直观地确定锻件上具有加工余量的部位和余量的大小。如图 2.3-15 所示。

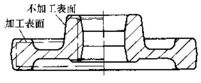


图 2.3-15　锻件加工余量示意图

（3）确定模锻斜度

锻件侧面都要有模锻斜度，以利于锻件出模。锻件冷却时趋向离开模壁的部分称为外斜度。反之称为内斜度。分模线两侧为使上下模匹配而人为增大的斜度为匹配斜度。锻件侧面固有的斜度称为自然斜度。

附加的模锻斜度会增加金属的损耗和机械加工余量，因此在保证锻件出模的前提下，应选用较小的模锻斜度。如果锻件的自然斜度能保证出模，就不应增加模锻斜度。内斜度通常比外斜度略大，锻模上深而窄的型槽选用较大的模锻斜度，反之可选用较小的斜度。如图 2.3-16 所示。

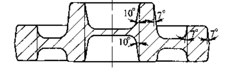


图 2.3-16　模锻斜度示意图

锻件模锻斜度可参考 GB/T 12361—1990《钢质模锻件通用技术条件》中的附录 A 进行设计。根据 GB/T 12361—1990 附录 A 的规定，如图 2.3-17 所示，α 表示外斜度，β 表示内斜度，在模锻锤、热模锻压力机和螺旋压力机上模锻的锻件，根据锻件各部分高度 H 与宽度 B 以及长度 L 与宽度 B 的比值 H/R，L/B 可在表 2.3-3 中查得相应的外斜度 α 值。内模锻斜度 β 按外模锻斜度 α 值加大 2°～3°，当模锻设备具有顶料机构时，模锻斜度可缩小 2°～3°。

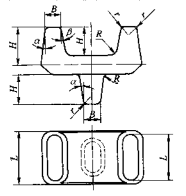


图 2.3-17　确定模锻斜度



为加工模具的方便，模锻斜度应选取0°，0.25°，0.5°，1.5°，3°，5°，7°，10°，12°和15°等标准度数，匹配斜度不受此限制。

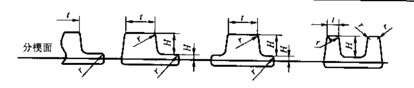
（4）确定圆角半径

锻件的凸角和凹角一般不允许呈尖角，应当设计成适当的圆角。锻件的凸角圆角半径称为外圆角半径，它的作用是避免锻模相应部位因产生应力集中导致开裂。凹角圆角半径称为内圆角半径，它的作用是使金属易于充满型槽，避免锻件产生折叠，防止型槽过早被压塌变形。

GB/T 12361—1990附录A分别对外圆角半径和内圆角半径的选用做出规定，见表2.3-4和表2.3-5。

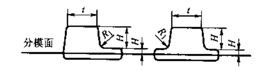
为了便于选用标准刀具，圆角半径应按以下系列选用：1，1.5，2，2.5，3，4，5，6，8，10，12，16，20，25，30，40，50，60，80，100 mm等。

表2.3-4　外圆角半径 *r* 的数值（摘自GB/T 12361—1990）



t/H	台阶高度/mm						
	≤10	10～16	16～25	25～40	40～63	63～100	100～160
0.5～1	2.5	2.5	3	4	5	8	12
>1	2	2	2.5	3	4	6	10

表2.3-5　内圆角半径 *R* 的数值（摘自GB/T 12361—1990）



t/H	台阶高度/mm						
	≤10	10～16	16～25	25～40	40～63	63～100	100～160
0.5～1	4	5	6	8	10	16	25
>1	3	4	5	6	8	12	20

（5）确定锻件公差

锻件的公差包括以下几类。

1）锻件的尺寸公差。锻件的尺寸公差包括厚度尺寸公差以及长度、宽度和高度尺寸的公差、落差公差、中心距公差等。厚度尺寸公差是指跨越分模线的厚度尺寸的公差。长度、宽度和高度尺寸的公差是指位于分模线同一侧的沿锻件长度、宽度和高度方向的尺寸公差。

2）锻件的圆角半径公差和角度公差。

3）锻件各部位形状和位置关系的公差。此类公差包括错差和壁厚差等公差以及直线度、平面度和同轴度等公差。错差是指锻件在分模线上下两部分对应点所偏移的距离，是由于两部分模具的错移造成的。壁厚差是指圆环形锻件的最大壁厚尺寸和最小壁厚尺寸的差值。对于环形件，壁厚差是同轴度公差的1/2。

4）锻件表面缺陷的公差。此类公差包括表面缺陷深度公差，横向残留飞边、纵向飞刺。切人深度的公差以及顶杆压痕公差和局部变形公差等。

锻件公差可根据所采用的模锻工艺、锻件质量、锻件形状复杂系数、锻件材料变形抗力和分模线形状来确定。

对模锻锤上生产的锻件，GB/T 12362—1990（钢质模锻件公差和机械加工余量）对各种公差有详细的规定。

表2.3-6和表2.3-7分别是GB/T 12363—1990对锻件长度、宽度、高度及错差、残留飞边的公差的普通级和精密级规定。

表2.3-8和表2.3-9分别是GB/T 12362—1990对锻件厚度及顶料杆压痕公差的普通级和精密级规定。

公差表的使用方法如下。

确定长度、宽度、高度和厚度尺寸公差时，首先按锻件质量选定相应范围，然后沿水平线向右移动，若材质系数为 M_1，则沿同一水平线继续向右移动，若材质系数为 M_2，则沿倾斜线向右下移动到 M_2 格的交点，对于形状复杂系数，则用同样的方法，沿水平线或倾斜线移动到 S_1 或 S_2、S_3 和 S_4 格的位置，然后沿水平线右移即可查得相应的公差值。采用类似的方法在查得锻件的质量范围后，向左移动可查得锻件的错差公差、残余飞边公差和顶料杆压痕公差。

公差表中锻件材质系数分为两级：M_1 和 M_2。

M_1 级：最高含碳量小于0.65%的碳素钢或合金元素总含量小于3.0%的合金钢。

M_2 级：最高含碳量大于或等于0.65%的碳素钢。

锻件的公差可以参照GB/T 12362—1990设计，也可由供需双方协商确定。

表 2.3-6　锻件的长度、宽度、高度及错差、残留飞边公差（普通级）（摘自 GB/T 12362—1990）

错差公差/mm	残留飞边公差/mm	分模线：平直或对称 / 非对称	锻件重量/kg 大于	锻件重量/kg 至	材质系数 M_1　M_2	形状复杂系数 S_1,S_2,S_3,S_4	锻件基本尺寸/mm 大于 0 至 30	大于 30 至 80	大于 80 至 120	大于 120 至 180	大于 180 至 315	大于 315 至 500	大于 500 至 800	大于 800 至 1 250	大于 1 250 至 2 500
							公差值及极限偏差/mm								
0.4	0.5		0	0.4			$1.1^{+0.8}_{-0.3}$	$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	—	—	—	—
0.5	0.6		0.4	1.0			$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.4}_{-0.6}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	—	—	—
0.6	0.7		1.0	1.8			$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.4}_{-0.6}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	—	—
0.8	0.8		1.8	3.2			$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.4}_{-0.6}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	—
1.0	1.0		3.2	5.6			$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.4}_{-0.6}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$
1.2	1.2		5.6	10.0			$2.0^{+1.4}_{-0.6}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$
1.4	1.4		10.0	20.0			$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.8}_{-1.7}$
1.6	1.7		20.0	50.0			$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.8}_{-1.7}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$
1.8	2.0		50.0	120.0			$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.5}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.8}_{-1.7}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7.0^{+4.7}_{-2.3}$
2.0	2.4		120.0	250.0			$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.5}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.8}_{-1.7}$	$6.3^{+4.2}_{2.1}$	$7.0^{+4.7}_{-2.3}$	$8.0^{+5.3}_{-2.7}$
2.4	2.8						$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.8}_{-1.7}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7.0^{+4.7}_{-2.3}$	$8.0^{+5.3}_{-2.7}$	$9.0^{+6.0}_{-3.0}$
							$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.8}_{-1.7}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7.0^{+4.7}_{-2.3}$	$8.0^{+5.3}_{-2.7}$	$9.0^{+6.0}_{-3.0}$	$10^{+6.5}_{-3.5}$
							—	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.6^{+3.8}_{-1.7}$	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7.0^{+4.7}_{-2.3}$	$8.0^{+5.3}_{-2.7}$	$9.0^{+6.0}_{-3.0}$	$10^{+6.5}_{-3.5}$	$11^{+7.5}_{-3.5}$
							—	—	$6.3^{+4.2}_{-2.1}$	$7.0^{+4.7}_{-2.3}$	$8.0^{+5.3}_{-2.7}$	$9.0^{+6.0}_{-3.0}$	$10^{+6.5}_{-3.5}$	$11^{+7.5}_{-3.5}$	$12^{+8.0}_{-4.0}$
							—	—	$7.0^{+4.7}_{-2.3}$	$8.0^{+5.3}_{-2.7}$	$9.0^{+6.0}_{-3.0}$	$10^{+6.5}_{-3.5}$	$11^{+7.5}_{-3.5}$	$12^{+8.0}_{-4.0}$	$13^{+8.0}_{-4.0}$

例：当锻件重量为 6 kg，材质系数为 M_1，形状复杂系数为 S_2，尺寸为 160 mm，平直分模线时各类公差查法。

注：锻件的高度或台阶尺寸及中心到边缘尺寸公差，按 ± 1/2 的比例分配。内表面尺寸极限偏差，正负符号与表中相反。



表 2.3-7　锻件的长度、宽度、高度及错差、残留飞边公差（精密级）（摘自 GB/T 12362—1990）

错差公差/mm	残留飞边公差/mm	分模线：非对称 / 平直或对称	锻件重量/kg 大于	锻件重量/kg 至	材质系数 M_1 M_2	形状复杂系数 S_1, S_2, S_3, S_4	锻件基本尺寸/mm 大于 0 至 30	大于 30 至 80	大于 80 至 120	大于 120 至 180	大于 180 至 315	大于 315 至 500	大于 500 至 800	大于 800 至 1 250	大于 1 250 至 2 500
							公差值及极限偏差/mm								
0.3	0.3		0	0.4			$0.7^{+0.5}_{-0.2}$	$0.8^{+0.5}_{-0.3}$	$0.9^{+0.6}_{-0.3}$	$1.0^{+0.7}_{-0.3}$	$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	—	—	—	—
0.4	0.4		0.4	1.0			$0.8^{+0.5}_{-0.3}$	$0.9^{+0.6}_{-0.3}$	$1.0^{+0.7}_{-0.3}$	$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	—	—	—
0.5	0.5		1.0	1.8			$0.9^{+0.6}_{-0.3}$	$1.0^{+0.7}_{-0.3}$	$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-5.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.3}_{-0.7}$	—	—
0.6	0.6		1.8	3.2			$1.0^{+0.7}_{-0.3}$	$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	—
0.7	0.7		3.2	5.6			$1.2^{+0.8}_{-0.4}$	$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.2}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$
0.8	0.8		5.6	10.0			$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$
1.0	1.0		10.0	20.0			$1.6^{+1.1}_{-0.5}$	$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$
1.2	1.2		20.0	50.0			$1.8^{+1.2}_{-0.6}$	$2.0^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$
1.2	1.2		50.0	120.0			$2.0^{+1.3}_{-0.7}$	$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$
1.4	1.4		120.0	250.0			$2.2^{+1.5}_{-0.7}$	$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.5^{+3.5}_{-2.6}$
1.4	1.7						$2.5^{+1.7}_{-0.8}$	$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.5^{+3.5}_{-2.0}$	$6.0^{+4.0}_{-2.0}$
							$2.8^{+1.9}_{-0.9}$	$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.5^{+3.5}_{-2.0}$	$6.0^{+4.0}_{-2.0}$	$7.0^{+4.5}_{-2.5}$
							$3.2^{+2.1}_{-1.1}$	$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.5^{+3.5}_{-2.0}$	$6.0^{+4.0}_{-2.0}$	$7.0^{+4.5}_{-2.5}$	$8.0^{+5.0}_{-3.0}$
							$3.6^{+2.4}_{-1.2}$	$4.0^{+2.7}_{-1.3}$	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.5^{+3.5}_{-2.0}$	$6.0^{+4.0}_{-2.0}$	$7.0^{+4.5}_{-2.5}$	$8.0^{+5.0}_{-3.0}$	$8.5^{+5.0}_{-3.5}$
							—	$4.5^{+3.0}_{-1.5}$	$5.0^{+3.3}_{-1.7}$	$5.5^{+3.5}_{-2.0}$	$6.0^{+4.0}_{-2.0}$	$7.0^{+4.5}_{-2.5}$	$8.0^{+5.0}_{-3.0}$	$8.5^{+5.0}_{-3.5}$	$9.0^{+5.6}_{-3.5}$

例：锻件重量为 3 kg，材质系数为 M_1，形状复杂系数为 S_2，尺寸为 120 mm，平直分模线时各类公差查法。

注：锻件的高度或台阶尺寸及中心到边缘尺寸公差，按 ± 1/2 的比例分配。内表面尺寸极限偏差，正负符号与表中相反。



表 2.3-8　锻件的厚度及顶料杆压痕公差（普通级）（摘自 GB/T 12362—1990）

压痕极限偏差/mm +(凸)	压痕极限偏差/mm -(凹)	锻件重量/kg 大于	锻件重量/kg 至	材质系数 M_1 M_2	形状复杂系数 S_1, S_2, S_3, S_4	锻件厚度尺寸/mm 大于 0 至 18	大于 18 至 30	大于 30 至 50	大于 50 至 80	大于 80 至 120	大于 120 至 180	大于 180 至 315
						公差值及极限偏差/mm						
0.8	0.4	0	0.4			$1.0^{+0.8}_{-0.2}$	$1.1^{+0.8}_{-0.3}$	$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$
1.0	0.5	0.4	1.0			$1.1^{+0.8}_{-0.3}$	$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$
1.2	0.6	1.0	1.8			$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$
1.5	0.8	1.8	3.2			$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$
1.8	0.9	3.2	5.6			$1.6^{+1.2}_{-0.2}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$
2.2	1.2	5.6	10.0			$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$
2.8	1.5	10.0	20.0			$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$
3.5	2.0	20.0	50.0			$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$
4.5	2.5	50.0	120.0			$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.7}_{-0.9}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$
6.0	3.0	120.0	250.0			$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.4}_{-0.8}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$
						$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$
						$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$	$7.0^{+5.3}_{-1.7}$
						$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$	$7.0^{+5.3}_{-1.7}$	$8.0^{+6.0}_{-2.0}$
						$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$	$7.0^{+5.3}_{-1.7}$	$8.0^{+6.0}_{-2.0}$	$9.0^{+6.8}_{-2.2}$
						$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$	$7.0^{+5.3}_{-1.7}$	$8.0^{+6.0}_{-2.0}$	$9.0^{+6.8}_{-2.2}$	$10.0^{+7.5}_{-2.5}$

例：锻件重量为 3 kg，材质系数为 M_1，形状复杂系数为 S_3，最大厚度尺寸为 45 mm 时各类公差查法。

注：上、下偏差也可按 +2/3、-1/3 比例分配。



表 2.3-9 锻件的厚度及顶料杆压痕公差（精密级）（摘自 GB/T 12362—1990）

压痕极限偏差/mm -(凸)	压痕极限偏差/mm -(凹)	锻件重量/kg 大于	锻件重量/kg 至	材质系数 M_1 M_2	形状复杂系数 S_1, S_2, S_3, S_4	锻件厚度尺寸/mm 大于 0 至 18	大于 18 至 30	大于 30 至 50	大于 50 至 80	大于 80 至 120	大于 120 至 180	大于 180 至 315
						公差值及极限偏差/mm						
0.6	0.3	0	0.4			$0.6^{+0.5}_{-0.1}$	$0.8^{+0.6}_{-0.2}$	$0.9^{+0.7}_{-0.2}$	$1.0^{+0.8}_{-0.2}$	$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$
0.8	0.4	0.4	1.0			$0.8^{+0.6}_{-0.2}$	$0.9^{+0.7}_{-0.2}$	$1.0^{+0.8}_{-0.2}$	$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$
1.0	0.5	1.0	1.8			$0.9^{+0.7}_{-0.2}$	$1.0^{+0.8}_{-0.2}$	$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$
1.2	0.6	1.8	3.2			$1.0^{+0.8}_{-0.2}$	$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$
1.6	0.8	3.2	5.6			$1.2^{+0.9}_{-0.3}$	$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$
1.8	1.0	5.6	10.0			$1.4^{+1.0}_{-0.4}$	$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$
2.2	1.2	10.0	20.0			$1.6^{+1.2}_{-0.4}$	$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$
2.8	1.5	20.0	50.0			$1.8^{+1.4}_{-0.4}$	$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$
3.5	2.0	50.0	120.0			$2.0^{+1.5}_{-0.5}$	$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$
4.5	2.5	120.0	250.0			$2.2^{+1.7}_{-0.5}$	$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$
						$2.5^{+2.0}_{-0.5}$	$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$
						$2.8^{+2.1}_{-0.7}$	$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$
						$3.2^{+2.4}_{-0.8}$	$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$
						$3.6^{+2.7}_{-0.9}$	$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$	$7.0^{+5.3}_{-1.7}$
						$4.0^{+3.0}_{-1.0}$	$4.5^{+3.4}_{-1.1}$	$5.0^{+3.8}_{-1.2}$	$5.6^{+4.2}_{-1.4}$	$6.3^{+4.8}_{-1.5}$	$7.0^{+5.3}_{-1.7}$	$8.0^{+6.0}_{-2.0}$

例：锻件重量为 3 kg，材质系数为 M_1，形状复杂系数为 S_3，最大厚度尺寸为 45 mm 时各类公差查法。

注：上、下偏差也可按 +2/3、−1/3 比例分配。

（6）冲孔连皮

在模锻锤、热模锻压力机和螺旋压力机等设备上模锻带孔锻件时，不能在锻件上直接锻出通孔，必须在孔内保留连皮，然后在冲孔工序中切除。孔径小于 25 mm 时，一般不宜冲孔，为利于金属充满型槽，可制成盲孔。

连皮设计必须选择合适的连皮厚度。连皮太薄，需要较大的打击力来保证锻件充满，对设备和模具不利；连皮太厚，既浪费金属，锻件又容易在冲孔时产生变形。

连皮形式可选用平底连皮、斜底连皮和带仓连皮三种结构如图 2.3-18 所示。

1）平底连皮（图 2.3-18a）。平底连皮适用于 $D<2.5h$ 或 $D<60$ mm 的锻件，连皮厚度 S 和圆角半径 R 值主要与设备吨位有关。表 2.3-10 为根据锻造设备吨位选用的连皮厚度 S 和圆角半径 R 值，设备吨位以模锻锤为例，在其他模锻设备上模锻时，可按设备吨位参照相应的锤上模锻工艺设计。

表 2.3-10 平底连皮厚度 S 和内圆角半径 R 的选用

锻锤吨位/t	1～2	3～5	10
S/mm	4～6	5～8	10～12
R/mm	5～8	6～10	7～20

2）斜底连皮（图 2.3-18b）。斜底连皮适用于 $D>2.5h$ 或 $D>60$ mm 的锻件。选取 $\alpha=1°\sim2°$，$S_1=1.35S$（S 为按平底连皮选用的连皮厚度），$S_2=0.65S$，内圆角半径 R 与平底连皮设计相同。

采用斜底连皮能增加连皮周边的厚度，既有利于排除多余金属，又有利于避免在连皮周边上产生折叠。

3）带仓连皮（图 2.3-18c）。当预锻模采用斜底连皮时，终锻模应采用带仓连皮。S_3 和 b 取飞边桥部的厚度和宽度

尺寸，R_1 取预锻模相应圆角半径的1/2。连皮仓部也可制成拱式。

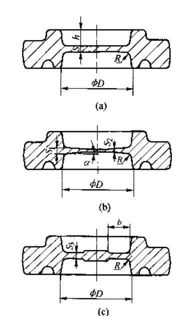


图2.3-18　锻件连皮的三种类型

带仓连皮可使内孔中多余的金属挤入连皮仓部，避免在连皮周边部位产生折叠。

(7) 技术要求

锻件图是锻件最终检验的基本依据，有关锻件精度及其检验的要求，凡是在锻件图样上没有表示的，都要在技术要求中用文字说明。其主要内容包括：

1) 未注明模锻斜度和圆角半径；

2) 表面缺陷深度和残留飞边允许值；

3) 错差允许值；

4) 锻件材料牌号、热处理方法和硬度值；

5) 表面清理方法；

6) 未注的尺寸公差和形状公差及位置公差；

7) 其他特殊要求。

3.2　选择模锻工艺

选择模锻工艺的主要依据是锻件的形状、尺寸和精度，锻件生产批量和现有设备条件等。同一锻件可以在不同设备上采用不同的工艺方法生产。锤模锻工艺方案选择可遵循以下原则。

1) 锻件精度要完全达到锻件图的要求，能为零件的机械加工创造良好的条件。对个别精度要求较高，在模锻中不易做到的尺寸精度和表面粗糙度等，可以考虑在后续工序中靠精压保证。

2) 具有较高的生产率，工艺稳定，适合大批量生产。

3) 锻件成本低。

①充分利用现有设备条件，减少设备投资。

②有较高的材料利用率和较低的能源损耗和模具损耗。

4) 劳动条件好，安全、环保和工业卫生等方面要符合国家有关规定。

在选定模锻设备和工艺后，要进一步确定具体的模锻方案。常用的模锻方案包括以下几种。

1) 单件模锻。一个坯料只锻一个锻件。大多数大、中型锻件采用这种模锻方案。

2) 调头模锻在终锻模膛内锻成第一个锻件之后，调转180°，用钳子夹住锻件，进行另一头锻件的锻造。使用这种方法可以节省钳夹头，在采用双人锻打时生产率很高。单个锻件以质量在2.5 kg以下，长度在300 mm以内的中、小型锻件为宜。否则坯料太重太长，不但使锻打操作极不方便，而且也使切边操作非常困难，劳动强度很大。如图2.3-19所示。

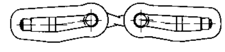


图2.3-19　调头锻

对于细长、扁薄或带落差的锻件，调头之后，会在锻第二个锻件时造成第一个锻件的变形，因此不宜采用调头锻。

有的锻件在单个锻造时不需要用钳夹头，成形又容易，生产效率很高，为了不增加劳动强度，也不采用调头锻。

3) 一火多件。用一根加热好的棒料连续锻几个锻件，每锻完一个锻件，用切断模膛将锻件从棒料上切下来。适用于锻件质量在0.5 kg以下的小锻件，连续锻打的锻件数为4～6件。件数太多的棒料过长操作不便，而且由于最后锻造的坯料温度过低，影响锻模的寿命和锻件的质量。

4) 一模多件。如图2.3-20所示。将几个锻件排列在同时锻出。对于质量在0.5 kg以下，长度不超过80 mm的小型锻件，可以大大地提高生产率。同时，由于总的周围飞边的减少，降低了飞边金属的损耗，并且还可以充分地利用模块面积。同时模锻的件数一般为两件，多者三件，件数过多时，锻模制造精度和锤锻精度均难保证锻件对错差的要求。因此，同时模锻三件以上的情况很少。一模多件时，往往同时结合采用一火多件的方法。这时，一根棒料所能锻打的件数根据具体情况可分为4～10件。

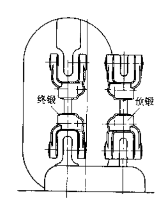


图2.3-20　一模多件

一模多件时，通过合理地排列锻件，往往能够使金属分布均匀，减少截面差，使锻件成形容易，简化模锻工步，节省钢材。

一模多件往往需要冷切飞边。排列锻件时，要注意切边的方便，间距不宜太小。

对于某些有落差的小锻件，一模两件时可以将锻件对称排列，使锻模带有平衡锁口，抵消模锻时的错移力。

用于一模多件的锻模，对终锻模膛应有更严格的要求。

5) 两种锻件合在一起锻（图2.3-21），如汽车连杆和连杆盖。不但一次可以锻出两种锻件，使锻件和模具的品种减少，便于管理。而且往往还有使金属分布更加均匀，锻件成形更为容易的优点。所以应该充分注意到这种合锻的可能性。

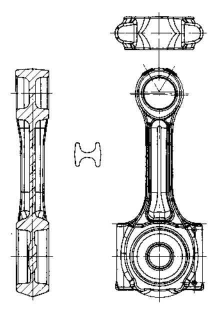


图 2.3-21　连杆及盖合锻

3.3　确定模锻锤吨位

模锻设备技术规格与锻件在分模线上的投影面积，材料变形抗力和锻件形状复杂系数有关。此外，闭式模锻和挤压成形所需压力比开式模锻要大。

模锻锤吨位是指锻锤落下部分的质量，以吨为单位，常用模锻锤吨位系列为：1 t，2 t，3 t，5 t，10 t，16 t。

按经验公式：

模锻锤吨位（t）　$G=(4\sim6)\times F/100$

式中，F 为锻件水平投影面积，cm^2（包括连皮和按仓部 1/2 计算的飞边面积）。

3.4　坯料计算

坯料体积包括锻件体积（含连皮），飞边体积、加热氧化损耗的体积和钳夹头的体积的总和。

(1) 锻件和飞边体积的计算

1) 锻件的体积（含连皮）可按锻件图计算，其中所有跨越分模线的厚度尺寸应按其名义尺寸加厚度尺寸上偏差的50%计算。

2) 飞边体积计算。一般锻件的飞边按充满仓部 50% 计算，复杂锻件或锻件的复杂部位的飞边按充满飞边仓部60%～90%计算。

具体计算：先按飞边仓部充满程度求出飞边有效截面积 S，按截面中心求出飞边的长度 L，则飞边体积 $V_f=S\times L$。

(2) 计算坯料规格

首先计算出锻件体积 V_d（含连皮）（mm^3），飞边体积 V_f（mm^3）。根据加热方式确定火耗率 δ，感应加热取 0.5%～1%，其他加热方式取 2%～3%。

1) 镦粗成形类锻件。

坯料体积：$V_p=(V_d+V_f)(1+\delta)$

按镦粗比 $m=1.5\sim2.3$ 计算坯料的直径 d_p（mm）和长度 L_p（mm），$m=L_p/d_p$。

按此方法计算：

$d_p=(0.97\sim0.82)\sqrt[3]{V_p}$

$L_p=1.27V_p/dt$（dt 为计算坯料的横截面积）

2) 长杆类锻件。长杆类锻件按锻件的最大截面积确定坯料直径。

$$d_p=1.13k\,F_{dm}$$

式中，d_p 为坯料直径，mm；F_{dm} 为锻件（含连皮和飞边）的最大截面积。当最大截面集中在较小范围内时，可按此范围内的平均截面积计算，mm^2；k 为系数，与坯料制坯时的聚料程度有关。锤上模锻采用滚压工步时，可取 $k=0.7\sim0.9$，其他制坯方式可取 $k=0.95\sim1$。

当不采用钳夹头时，坯料长度 L_p（mm）为：

$$L_p=1.27(V_d+V_f)(1+\delta)/d_p^2$$

当采用钳夹头时，坯料长度 L'_p（mm）为：

$$L'_p=L_p+L_t$$

式中，L_t 为一钳夹头的长度，mm；L_t 一般可按（1.0～1.5）d_p 确定，d_p 为坯料直径，d_p 大时取小系数，d_p 较小时取大系数。

锤模锻锻件用原材料一般为轧制圆钢或方钢，坯料直径或边长应按国家标准选取合适规格，然后根据坯料体积求出坯料长度。

4　终锻模膛设计

终锻模膛是用来完成锻件最终成形的模膛，所以锻模设计首先应设计终锻模膛。而该模膛的设计、制造与检验要依据热锻件图，因此首先要设计热锻件图。

4.1　热锻件图的确定

绘制热锻件图依据冷锻件图。

1) 在热锻件图的全部尺寸上都应计入收缩率。对于一般的结构钢，收缩率按 1.5%计算。

$$L_R=L(1+1.5\%)$$

式中，L_R 为锻件热尺寸；L 为锻件冷尺寸。

2) 热锻件图应明确示出分模面位置，并指明哪一部分在上模，哪一部分在下模。

3) 热锻件图是供制造锻模用的，因此不必注明锻件公差，但是对于要求很严的尺寸，可以个别注出必保的制模公差。

4) 注明未注的拔模角、圆角及尺寸收缩率。

5) 热锻件图上应绘出锻件冲孔前的连皮，不绘制产品轮廓线。

有以下几种情况，热锻件图与冷锻件图出入较大。

1) 用小设备锻大锻件时，锤的打击能量不足，难以将锻件打靠，有时可适当减少终锻模膛深度尺寸，减少量视具体情况而定，但使用此法必须慎重。以保证锻件高度方向的尺寸。

如果用大设备打小锻件时，分模面易打塌，造成锻件高度尺寸小于锻件允许最小尺寸，为保证锻件尺寸要求和模具使用寿命，将终锻模膛深度尺寸按锻件允许的最大尺寸设计。

对于难以充满的凸起小台，也可将其适当加深，以利于充满。

2) 终锻模膛易磨损处应按锻件允许最小尺寸设计，加十字轴（见图 2.3-22），四个轴的根部易磨损，将其按 ϕ_2 值减下偏差设计，能延长该模具的寿命。

3) 对于上模有较高的筋，下模不易定位的锻件，锻造时易转动，须将下模加定位余块，以保证每次打击时锻件不易产生相位变动。

4) 当锻件较大某些部分又比较复杂，为节省金属不设夹钳料头时，应在终锻模膛两侧设计沟槽，便于撬杠伸进飞边底部帮助起模。如图 2.3-23 所示。

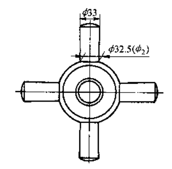


图 2.3-22　十字轴根部设计

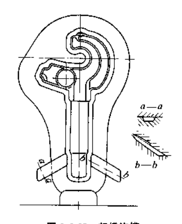


图 2.3-23　起模沟槽

4.2　飞边槽的确定

（1）飞加槽的作用

1）增加水平方向的阻力，迫使金属充满型槽。

2）型槽充满后，多余的金属向外排除，飞边槽用来容纳多余的金属。

3）飞边槽还可缓冲撞击，减少上、下模直接撞击。

（2）飞边槽的型式

飞边槽由飞边桥部和仓部组成，常见的有四种，如图 2.3-24 所示。

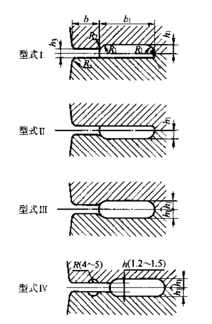


图 2.3-24　飞边槽的四种型式

1）型式Ⅰ　飞边仓部设在上模块。这种型式的飞边槽受热时间短，不易磨损，一般齿轮件、轴类件等都采用这种型式的飞边槽。如图 2.3-25 所示。

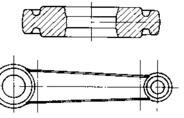


图 2.3-25　采用Ⅰ型式飞边槽的锻件

2）型式Ⅱ　飞边仓部设在下模块。这种型式的飞边槽适用于上模形状比较复杂的锻件。目的之一是利于上模充满；目的之二是简化切边凸模型状，将锻件翻转达 180°切边。此外，当整个锻件在下模成形时，为简化上模加工制造，也应采用这种型式的飞边槽。如图 2.3-26 所示。

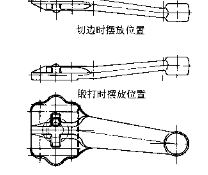


图 2.3-26　采用Ⅱ型式飞边槽的锻件

3）型式Ⅲ　适用于形状复杂比较难充满的锻件和坯料体积难免偏多的锻件，不得不增大仓部，以便容纳更多的金属。如图 2.3-27 所示。

4）型式Ⅳ　一般只用于锻件形状复杂难以充满的局部地方，如高筋，叉口处或枝芽处，这样可以增加桥部阻力，迫使金属更好地充满复杂的模膛。如图 2.3-28 所示。

（3）飞边槽的尺寸确定

通常按锤的吨位大小确定飞边尺寸。飞边槽尺寸见表 2.3-11。

表 2.3-11 数值适用于一般情况，遇有下列特殊情况时，应适当修改 h_3、h_1、b 或 b_1、R 的数值。

1）当所选用的锤吨位大于锻件所需吨位时，为了防止金属向飞边槽流动过快，影响锻件的充满成形，应适当减小 h_3 的数值，例如：某锻件用 1 t 模锻锤即可，但由于某种原因，只能由 2 t 模锻锤来锻打，那么 h_3 的值就不应选择 2 mm而应选择 1.6 mm。

2）与 1）相反，当所选用的锤吨位小于锻件所需吨位时，为减少飞边的变形阻力，防止锻模打不靠，在保证模膛充满的条件下适当增加 h_3 值。即：若用 1 t 锤锻模锻 2 t 锤上的锻件时，h_3 不能选取 1 ~ 1.6 mm，而应增大 h_3 的值，选择 2 mm。

3）当锻件比较复杂难以充满时，为了增加飞边阻力，保证模膛的充填，应适当减小 h_3 值或适当增大 b 值。

① 当锻件形状比较简单时，在保证锻件成形的情况下，为了减少锤击次数，可适当增加 h_3 值或适当减少 b 值。

② 对于短轴类锻件，当锻模带有封闭形状的锁口时，为了防止操作时因毛坯放偏而将飞边挤到锁口里，应适当加大仓部尺寸 b_1 值（见表 2.3-11 备注栏中的尺寸）。

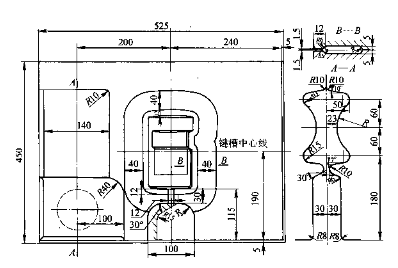


图 2.3-27　采用Ⅲ型式飞边槽的锻件



图 2.3-28　采用Ⅳ型式飞边槽的锻件

表 2.3-11　飞边槽尺寸

锻锤吨位/t	h_3/mm	h_1/mm	b/mm	b_1/mm	备　注
1	1～1.6	4	8	10	带锁扣齿轮模 $b_1 = 30$ mm
2	2	4	10	30～35	带锁扣齿轮模 $b_1 = 40$ mm
3	3	5	12	30～40	带锁扣齿轮模 $b_1 = 45$ mm
5	3	6×2	12	50	带锁扣齿轮模 $b_1 = 55$ mm
10	5	6×2	16	50 mm	
16	8	8×2	20	70	

注：表中，h_3 为飞边桥部高度；h_1 为飞边仓部高度；b 为飞边桥部宽度；b_1 为飞边仓部宽度；R 为模膛与飞边桥部之间圆角。

4.3　终锻模膛的绘制及尺寸标注

1）终锻模膛一般情况不标注尺寸，其所有型腔尺寸按热锻件图制造，热锻件图画在锻模图右上角处。锻件的投影图形一般只在下模绘出。

2）必须给出飞边槽的图形并标注尺寸，指出模膛与飞边桥过渡处的 R 值（边缘 R）。

3）注明燕尾中心线和键槽中心线的位置。这两条线确定了锻件的打击中心。在单模膛成形（没有预锻模膛）时，模膛中心最好与打击中心一致。如图 2.3-29 所示。

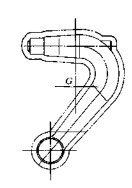


图 2.3-29　模膛中心与打击中心 G

5　预锻模膛的设计

预锻模膛用来改善金属在终锻模膛中的流动条件，使其易于充满终锻模膛，并提高模具使用寿命。因此对于形状较为复杂的锻件，常采用预锻模膛。

5.1　预锻模膛的采用原则

（1）对于图 2.3-30～图 2.3-34 所示锻件采用预锻模膛

1）带有工字形截面的锻件，如图 2.3-30 所示。

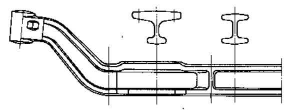


图 2.3-30　工字截面的锻件

2）需要劈开的叉形锻件，如图 2.3-31 所示。

3）带有枝芽的锻件，如图 2.3-32 所示。

4）具有高筋的锻件，如图 2.3-30 所示。

5）具有较深孔的锻件，如图 2.3-33 所示。

6）形状复杂难充满的锻件，如图 2.3-34 所示。

（2）为了延长模膛的使用寿命采用预锻模膛

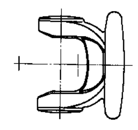


图 2.3-31 叉形锻件

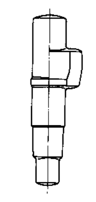


图 2.3-32 有枝芽的锻件

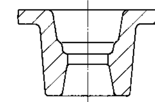


图 2.3-33 深孔件

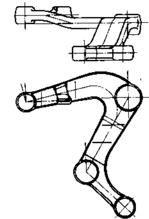


图 2.3-34 形状复杂件

5.2 采用预锻模膛带来的不利因素

采用预锻模膛也有一些不利因素。因此是否采用预锻模膛也要从两个方面来考虑。

1）由于采用了预锻模膛，终锻模膛不能位于打击中心位置上，终锻时产生的偏击将造成锻件错差，增加了模具调整的困难。锻件在分模面宽度方向尺寸越大，这种现象就越严重。当偏击力过大时，锻造过程中易使模具破裂。

2）为保证质量尽量避免终锻时产生错移，所以在模具设计时，通常将终锻模膛布排得更紧靠打击中心，以减少偏击力，这就使得预锻模膛偏离打击中心更远，此时预锻后的锻件错差就不可避免。如果在上模中成形部分有凸台或台阶，在终锻时就会如图 2.3-35 所示的那样啃出折叠，致使锻件报废。

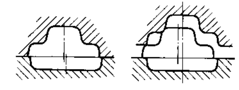


图 2.3-35 错移产生折纹过程

3）采用预锻模膛将增大模块尺寸，提高了模具制造成本。

4）增加预锻模膛后，有的锻件在分模面宽度方向尺寸较大，要求预锻模膛的宽度不能超出燕尾承击面的三分之一，如图 2.3-36 所示。如果满足不了该要求，就要增加设备，采用二台设备联合锻造：一台制坯、预锻，一台终锻。

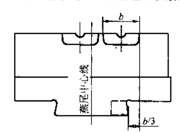


图 2.3-36 预锻模膛超出燕尾承击面最大限量

5.3 预锻模膛的设计原则

预锻模膛是依据热锻件图进行设计的，与终锻模膛有一些区别，如圆角加大，采用较大的拔模角，局部做成圆滑形状等等。

（1）拔模角

一般情况下，预锻模膛的拔模角和终锻模膛一致，当模膛的某些部分较深时，为了便于充满和出模，应将这部分的拔模角加大，预锻模膛拔模角增大值可按表 2.3-12 选取。

表 2.3-12 预锻模膛拔模角 (°)

终锻模膛拔模角	3	5	7	10	12
预锻模膛拔模角	5	7	10	12	15

1）预锻模膛拔模角增大，应保持分模面尺寸不变，使模膛底部尺寸缩小。如果以模膛底部尺寸不变，加大拔模角后，分模面上的尺寸加大，终锻时，终锻模膛的边缘会将预锻坯上多余的金属啃下来，压在锻件上形成折叠。如图 2.3-37 所示。

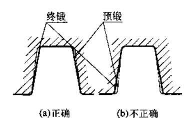


图 2.3-37 增加预锻模量拔模角



2）如果 $b<20$ mm 时，可按终锻模模膛底部尺寸设计预锻模膛，则不增加拔模角，而将预锻模膛深度减小，如图2.3-38所示，原则是 A 处体积等于 B 处体积。

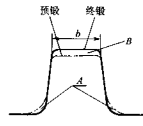


图 2.3-38　$b<20$ mm 可不增加拔模角

(2) 圆角半径的确定

预锻模膛的圆角，一般都比终锻模膛大，这样不但有利于金属流动，利于充满模膛，而且还可避免因预锻模膛和终锻模膛的不吻合而产生的折纹。

预锻模膛沿分模而边缘的圆角一般按下式确定：

$$R_1=R+C$$

式中，R_1 为预锻模膛沿分模面边缘圆角半径；R 为终锻模膛沿分模面边缘圆角半径；C 为圆角半径增大值，见表2.3-13。

表 2.3-13　预锻模膛边缘圆角半径增大值

模膛深度	<10	10~25	25~50	>50
C/mm	2	3	4	5

C 值的选取可按预锻模膛最大深深度决定，同一型膛 R_1 值要统一，这样便于制造。

1）当锻件具有凸起部分或肋筋部分时，如图2.3-39所示。

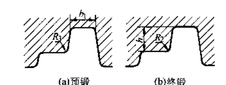


图 2.3-39　预锻模膛圆角半径

Ⅰ当 $h\leqslant b_1$ 时，则 $R_3=R_2$

Ⅱ当 $h>b_1$ 时，则 $R_3=R_2+$（3~5）mm

2）若锻件两截面交接处的截面差较大或其平而投影有急转弯处，设计预锻模时，应将该处的圆角加大，尽量圆滑过渡，既便于金属流动，又避免在转弯处产生折叠。一般情况，$R_1\geqslant 10R$，将折纹留在飞边里，如图2.3-40所示。

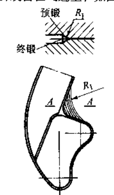


图 2.3-40　预锻模膛转角处设计

3）叉形锻件的预锻模膛设计　叉形锻件的叉部都需在预锻模膛中设计劈开台将金属分开，劈开台的形式如图2.3-41所示，各部分尺寸按下式确定：

$A\approx 0.25B$　应保证 $5<A<30$

$h=(0.4\sim0.7)H$　一般取 $h=0.5H$

$\alpha=10°\sim45°$由 H 而定

$R=10\sim40$

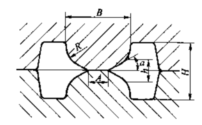


图 2.3-41　劈开台

为了使叉部在终锻时不会因金属倒流而在叉口的内侧而产生折纹，需要在按以上公式确定劈开台尺寸后，再核算一下由于劈开台的斜而使叉口产生多余金属量，与终锻模膛在叉口部分的飞边槽容积是否相近，也就是说图2.3-42a中的面积 C 与图2.3-42b的面积 D 是否相等或者接近。如果 C 比 D 大很多，终锻时叉口中间的飞边槽容积容纳不下劈开时产生的多余金属，这时就会有倒流现象。金属在终锻模膛中的流动情况如图2.3-43所示，此时叉口内侧就会出现折纹。因此应重新考虑终锻模膛内口部分飞边仓部尺寸，使面积 $C\approx D$。这时金属流动情况就如图2.3-44所示，在终锻时多余金属不但向四周飞边槽排出而且还可排向叉口中间的飞边仓部中去，避免了金属倒流现象，使叉口内侧不产生折叠。

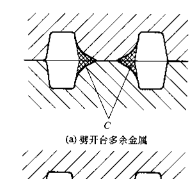


图 2.3-42

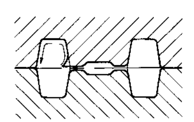


图 2.3-43　多余金属倒流

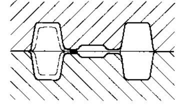


图 2.3-44　金属正常流动情况

劈开台通常是做得一样宽，如图 2.3-45 所示。

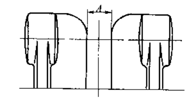


图 2.3-45　等宽劈开台

如果锻件的 B 和 H 值都较大，如图 2.3-46a 所示，劈开时金属流动路线较远同时即经两侧分开，又挤向叉口前方，致使叉口的外侧或较深的地方不易充满。为了改善金属流动情况，可将劈开台中间部分尺寸设计成如图 2.3-46b 所示的斜式形状（一般倾斜 5°～10°），可大大减少流向叉口前方的金属。

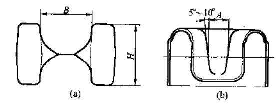


图 2.3-46　不等宽劈开台

当叉口较窄较深时，可采用图 2.3-47 所示的劈开台，在叉口的内侧面上不做斜面，而用一个选定的 R 将两侧连接起来。

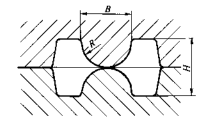


图 2.3-47　叉口较窄较深时劈开台

4）工字形截面锻件的预锻模膛设计　工字形截面锻件的预锻模膛设计可根据其截面和尺寸分为三种方法设计。

① 当工字形截面的中间以较大的圆弧连接时，如图 2.3-48 所示，工字形截面充满较容易，可将预锻模膛的相应截面设计成椭圆状的截面，使预锻模膛的截面 F_2 等于终锻模膛的截面 F_1，即 $F_1 = F_2$。

② 当工字形截面尺寸 $h < 2b$ 时，如图 2.3-49 所示，预锻模膛可设计成长方形截面，其截面尺寸为：

$$B_2 = B_1 - (2 \sim 6)\ \text{mm}$$

$$H_2 = F_1 / B_2$$

式中，F_1 为终锻模膛截面积；B_1 为终锻模膛的宽度；B_2 为预锻模膛的宽度；H_2 为预锻模膛的深度。

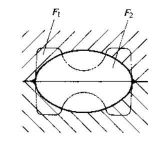


图 2.3-48　易充满工字截面的预锻模膛

在实际设计中，通常将 H_2 值定得小些，如果终锻时出现工字形的筋部充不满，可用砂轮打磨相应部分，即可消除充不满，比消除因金属倒流造成折叠要容易些。

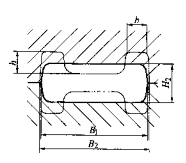


图 2.3-49　$h < 2b$ 时预锻模膛

③ 当工字形截面尺寸 $h > 2b$ 时，如图 2.3-50 所示，预锻模膛则应设计成圆滑的工字形截面。预锻模膛的宽度 B_2 可与终锻模膛的宽度 B_1 一样宽，也可设计成比 B_1 小 1～2 mm，视锻件的大小而定。工字形截面的中间幅板厚度，设计成和终锻模膛一样厚。

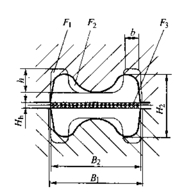


图 2.3-50　$h > 2b$ 时预锻模膛

由于预锻时已有金属排到分模面上造成 H_h 的锻压不足，对于 1～2 t 锤，H_h 大约是 1.5～3 mm，当 B_h 大于 35 mm时，设计预锻模膛时要考虑锻压不足量使面积 $F_1 = F_2 + F_3$。

5）枝芽锻件预锻模膛设计　如果锻件上带有枝芽，则应尽量简化枝芽的形状，使金属易于充满模膛。为了便于金属向枝芽方向流动，应将枝芽外的预锻模膛设计成如图 2.3-51 所示的喇叭形，其端部保持原来的尺寸不变，根部圆角半径加大，一般取 $R_1 = (2 \sim 5)\ R$。

特别难充满的部分，在分模面上采用阻力沟以增加金属流向分模面的阻力。如图 2.3-51 所示，直径为 $\phi 8 \sim 12$ mm。

6）宽度尺寸较大锻件预锻模膛设计　一般预锻模膛不





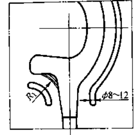


图 2.3-51　枝芽件预锻模膛

设计飞边槽，但当锻件较宽时，预锻时产生的飞边垫在远离打击中心的分模面上，产生很大的偏心力矩，并易使终锻模膛或模具燕尾裂开，如图 2.3-52 所示，所以宽度较大的锻件预锻模膛需设计如图 2.3-53 所示的飞边槽，将金属封闭在模膛和飞边槽内。

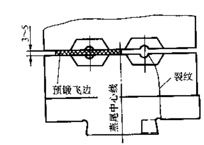


图 2.3-52　宽锻件预锻时模具开裂

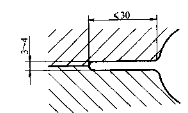


图 2.3-53　宽锻件预锻模膛飞边槽

7）扁薄件的预锻模膛设计　设计预锻模膛时一般圆角半径大于其终锻模膛的圆角半径，但对扁薄件在终锻时很难定位，稍放偏一点，就会将锻件打废（一边充不满）。为解决终锻难以定位的问题，在预锻模膛的四周设计成如图 2.3-54 所示的形状，这样终锻时即使坯料放置得不是很准，也不致将锻件打废。

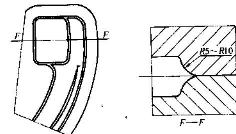


图 2.3-54　扁薄件的预锻模膛

5.4　预锻模膛的尺寸标注

1）一般锻件预锻模膛多数尺寸与终锻模膛一致，只标注与终锻模膛不一致之处，或与终锻不同的局部剖面尺寸。

2）较复杂的锻件需要单独另行绘制预锻件图，模膛尺寸皆在预锻件图上注明。

6　钳口

6.1　钳口的作用

1）在锻造时放置钳子夹头和钳子。

2）在不用钳子夹头情况下，可以利用钳子挑起钳口处溢出的飞边，帮助起模。

3）在模具制造中钳口被用作浇灌口，通过它灌入收缩量较小的融盐（如用 30% KNO_3 + 70% $NaNO_3$）来复制模膛形状，用此浇出件来检查模膛的形状和尺寸。

6.2　钳口尺寸的确定

1）钳口形状如图 2.3-55 所示，尺寸按表 2.3-14 确定。

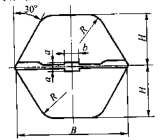


图 2.3-55　钳口

表 2.3-14　钳口尺寸

夹钳料头直径/mm	<18	18~28	28~35	35~40	40~50	50~55	55~65	65~70	70~80	80~90	90~95	95~105	105~115
B/mm	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
H/mm	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
R/mm	10			15						20			

2）当不用钳子夹头时，钳口只作为浇灌口，这时钳口宽度 B 只要保证浇灌时液体不能外溢能起到漏斗作用即可，要求 $B \geqslant 50$ mm。$H = B/(2 \sim 5)$。

3）钳口到终锻模膛边缘的距离 L_1，根据模膛的排布而定（图 2.3-56）。

4）钳口颈的宽度 b、高度 a 值，根据锻件的重量而定，必须保证锻件和钳子夹头之连接部分有一定的强度。

① 当锻件重量 $G < 10$ kg 时，钳口颈尺寸可按表 2.3-15 选取。

表 2.3-15　钳口颈尺寸

G/kg	<0.2	0.2~2	2~3.5	3.5~5	5~6.5	6.5~8	8~10
b	8	10	10	12	12	14	14
a	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4



② 当 $G>10$ kg 时，钳口颈可以做成圆形的通槽，如图 2.3-56 所示，钳口颈直径和长度的计算如下：

$$D=0.2G+10$$
$$=(0.5\sim0.7)\ h_0$$

式中，h_0 为钳口处的模膛深度，$h_0\geqslant 12$ mm。

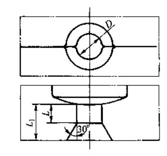


图 2.3-56　圆形钳口

5）当预锻模膛与终锻模膛的钳口相邻间距 $e<15$ mm 时，应将其开通做成一个公用的钳口，以避免此处的承击面塌陷。如图 2.3-57 所示。

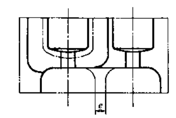


图 2.3-57　公用钳口

7　拔长模膛

7.1　拔长模膛的作用与型式

拔长模膛是用来减少坯料局部的横截面积，延伸坯料纵向尺寸，使坯料的体积沿轴线重新分配以利于锻件的充满与成形。

（1）开式拔长模膛

开式中又分平拔长模膛和弧形拔长模膛。如图 2.3-58 所示、图 2.3-59 所示。

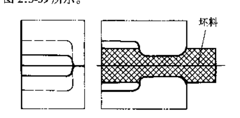


图 2.3-58　开式平拔长模膛

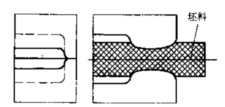


图 2.3-59　开式弧拔长模膛

平拔长模膛形状简单，容易制造，但延伸效率较低，多用于坯料直径在 25 mm 以上、拔长部分较短的情况。

弧形拔长模膛比平拔长模膛的延伸效率高，对各种直径的坯料均适用，应用很广泛。设计拔长模时优先考虑，如图 2.3-60 所示。

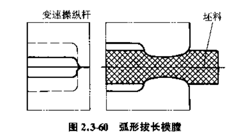


图 2.3-60　弧形拔长模膛

（2）闭式拔长模膛

闭式拔长模膛的横截面形状如图 2.3-61 所示，由于拔长时限制了坯料的展宽，所以延伸效率高。对于棒料在 25 mm 以下面拔长部分较长的坯料较为适用。

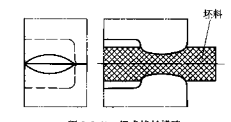


图 2.3-61　闭式拔长模膛

但这种模膛在第一次打击后形成的是椭圆形截面，当坯料翻转 90°后第二次打击时容易弯曲，所以这种模膛的压下量应避免过大，操作时坯料也应准确地放在模膛的中心线上，这种模膛的制造比较困难，应用也不广泛。

7.2　拔长模膛的结构

拔长模膛的结构如图 2.3-62 所示，确定模膛尺寸的参数如下：a 为开口量；R_1 为弧形拔长模的弧形半径；R 为过渡圆角半径；C 为拔长口长度；B 为拔长模膛宽度（图上未表示）；h 为拔长模膛高度；L 为拔长模膛总长度；b 为钳口高度。

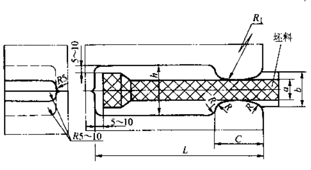


图 2.3-62　拔长模膛结构

7.3　拔长模尺寸的确定

（1）开口量 a 的确定

$$a=(0.8\sim0.85)\ \sqrt{F_{\min}}$$

式中，$F_{\min}$ 为拔长后坯料的最小截面积，即锻件杆部面积与飞边面积之和，mm²。

式中系数 0.8～0.85 的取值原则如下。



1）当拔长后的最小截面积所占长度较大时取小值。

2）当拔长后的最小截面积所占长度较小时取大值；拔长后用滚压时取大值。

实际应用中，常将计算的 a 值有意减小 3%～4%，然后，通过调试再将 a 值修整成合适的数值。

（2）拔长口长度 C 的确定

$$C = kd_p$$

式中，C 为拔长口长度，mm；d_p 为原坯料直径，mm；k 为系数。

k 值由 L_p（被拔长部分坯料原始长度）和 d_p 决定。见表 2.3-16。

表 2.3-16 拔长系数 k

L_p	$<1.2d_p$	$(1.2\sim2)d_p$	$(2\sim3)d_p$	$(3\sim4)d_p$	$4d_p$
k	0.8～1	1.2	1.4	1.5	2

有时，在同一拔长模膛中拔长的坯料有截面面积不相等的拔长段，这时要根据实际情况修正计算出的 C 值。如图 2.3-63 所示。

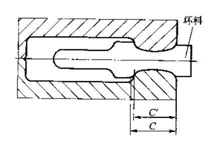


图 2.3-63 修正 C 值

（3）圆弧 R 与 R_1 的确定

$R = 0.25C$

$R_1 = 10R = 2.5C$

（4）拔长模膛的宽度 B 值的确定

1）一般情况

$$B = 1.5d_p$$

式中，d_p 为原坯料直径或边长，mm。

2）在模块宽度比较宽裕时，可将模膛宽度加大，即

$$B = 1.5d_p + 10\ \text{mm}$$

（5）拔长模膛斜置 α 角的确定

在坯料较长的情况下（可能是锻件较长或是一模两件时），为了使操作者便于操作，将位于模块左侧的拔长模膛倾斜一个角度 α。如图 2.3-64 所示，α 值可根据模膛的位置选用 10°、15°、18°或 20°，考虑坯料拔长时不碰到锤柱即可。

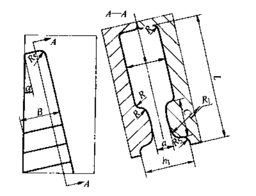


图 2.3-64 斜置的拔长模膛

7.4 拔长平台的设计

在坯料被拔长部分的原始长度很短的情况下，一般的拔长模膛难以将坯料咬住，这时可采用拔长平台进行拔长。拔长平台形状简单，多位于模具的一角，如图 2.3-65 所示。

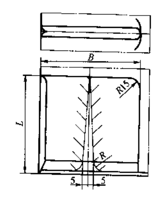


图 2.3-65 拔长平台

$$B = (1.4\sim1.6)d_p$$

$$R = 0.25d_p \quad L = L_{需} + 10\ \text{mm}$$

式中，d_p 为坯料直径；R 为按 5 的倍数圆整；$L_{需}$ 为拔后坯料所需的长度。

8 滚压模膛设计

8.1 滚压模膛的作用与型式

（1）作用

1）滚压模膛可以用来减少部分横截面的面积，增加另一部分的截面积并少量增加长度，使金属沿坯料轴线得到更合理更准确的分配，获得近似于计算毛坯的形状。

2）还可去除氧化皮并将拔长时的凸凹不表面压平，使坯料外形圆浑，避免终（预）锻时产生折叠。

（2）型式

1）开式滚压模膛，如图 2.3-66 所示。该模膛截面为矩形，比较容易制造，但聚料效果较低，应用不广泛。一般是在坯料需具有矩形截面时使用。

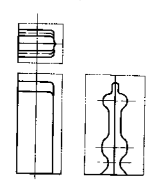


图 2.3-66 开式滚压模膛

2）闭式滚压模膛，如图 2.3-67 所示。该模膛截面为圆弧构成的鱼背形，它聚料效果好，坯料表面光滑，因此被广泛采用，是最常见的型式，但模具制造较复杂。

3）混合式模膛，如图 2.3-68 所示。该模膛为开式和闭式的混合型式，杆部为闭式，头部为开式，使头部坯料形成矩形来满足终（预）锻模膛的需要。

4）不等宽闭式模膛，如图 2.3-69 所示。当坯料头部与杆部的截面差较大时，将杆部模膛宽度减小，以利于杆部聚料，并防止打击过扁，终（预）锻时产生折叠。

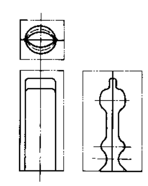


图 2.3-67　闭式滚压模膛

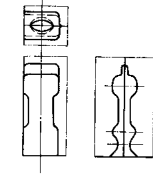


图 2.3-68　混合式滚压模膛

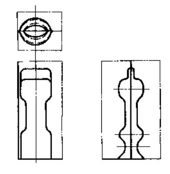


图 2.3-69　不等宽闭式滚压模膛

5）不对称模膛，如图 2.3-70 所示。当锻件在分模面上的投影对于中心线有明显的不对称凸出部分时，为使该处易于充满，可采用不对称滚压模膛。坯料经滚压后转 90°，置于终（预）锻模膛内，使坯料与模膛的不对称处相适应。

根据经验：$h_1/h_2 < 1.8$ 时效果较好。

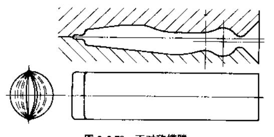


图 2.3-70　不对称模膛

8.2　滚压模膛的尺寸确定

（1）滚压模膛纵向截面形状的设计

1）将热锻件的主要视图画在坐标格子纸上，用 1∶1 的比例。

2）垂直锻件的纵轴线截取典型截面，在形状变化急剧部分多取些截面，形状变化较平缓处取得疏些，如图 2.3-71 所示。

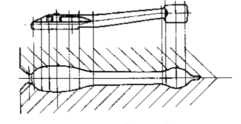


图 2.3-71　截取典型截面

3）计算各典型截面的面积，单位为 mm^2，如果截面形状复杂，需先将截面画出，然后计算面积。

4）计算滚压模膛高度 h 的公式如下：

$$h = k\sqrt{F_d + F_f} \qquad (1)$$

式中　h——滚压模膛对应截面的计算高度；

F_d——锻件对应截面的面积；

F_f——对应截面两侧的飞边截面积；

k——系数，按表 2.3-17 选取。

表 2.3-17　系数 k 值

坯料直径 d_p/mm	坯料截面要减小的部分		坯料截面要增加的部分
	开式	闭式	
<30	0.9	0.85	1.2
30~60	0.85	0.80	1.15
>60	0.8	0.75	1.13

将计算出的 h 值除以 2，并圆整，就得出上或下模膛的高度值 $h/2$。

为便于检查核对，各截面计算出的数据应列出表格并画在坐标格子纸上。

5）对应锻件的长度上的各截面位置做横坐标，计算出的对应截面的 $h/2$ 值做为纵坐标。

6）用适当的圆弧和直线连接做好的点，构成滚压模膛的纵向轮廓。一般情况下，上、下模膛的形状是对称的，模膛轮廓尽可能圆浑，连接各点的外圆弧半径一般不小于 25 mm。对于杆部较长时，为使金属流向头部，可做出 2°~3°的斜度。对带孔锻件，其滚压纵向截面形状还需修正。

7）利用计算机设计滚压模膛时，减少了各截面的计算量，可找几个典型截面计算出 $h/2$，或将复杂截面轮廓绘出，用计算机算出该截面的面积值，将热锻件外轮廓做成块调入滚压模膛位置，然后参考其外轮廓形状和 $h/2$ 值的点来圆滑连接，形成滚压模膛。

另外，可调入热锻件外轮廓来检查或修正已设计出的滚压模膛。

（2）滚压模膛横截面形状的设计

1）开式模膛的各横截面为等宽的矩形，如图 2.3-72 所示，宽度值 B 见表 2.3-18，h 值见公式（1）。

2）闭式模膛的横截面为圆弧构成的鱼背形，宽度值见表 2.3-18，高度 h 值见公式（1）h 值计算。根据确定了的 B 和 h 值，按三点定一圆的原理作图求出选定的圆弧半径，与分模面用 R 连接，另一半模膛的截面形状与之对称，如



图 2.3-73 所示。

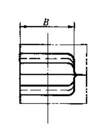


图 2.3-72　开式模截面

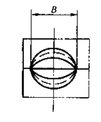


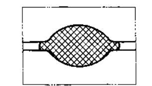
图 2.3-73　闭式模截面

根据锻件的形状，滚压模膛的高度沿轴线方向变化，在不同高度的截面上，构成鱼背形的圆弧大小也是不同。

表 2.3-18　滚压模膛宽度（B）的确定

坯料情况	模膛型式	计算公式
坯料未经拔长	开式	$B=1.5d_p$（$1.7S_p$） 模块宽度小时：$B=F_p/h_{min}$，但应使 $B\geqslant 1.4d_p$（$1.5S_p$）
	闭式	$B=1.7d_p$（$1.9S_p$） 模块宽度小时：$B=1.15F/h_{min}$，但应使 $B\geqslant 1.5d$（$1.6S_p$）
坯料经过拔长	开式	$B=$（1.4～1.5）d_p［（1.5～1.6）S_p］ 模块宽度小时，取较小的系数
	闭式	$B=$（1.4～1.5）d_p［（1.6～1.7）S_p］ 模块宽度小时，取较小的系数

（3）滚压模膛的宽度与模膛型式及滚压前坯料是否经过拔长有关。特别对闭式模膛，如果过宽，聚料效果差，过窄则会出毛边，翻转 90°再锻将形成折叠如图 2.3-74 所示。



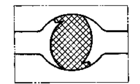


图 2.3-74　滚压模膛过窄形成折叠

（4）滚压模膛的尾部与钳口

1）模膛的尾部开出与模膛等宽的槽，以容纳滚压时从坯料上挤出的毛刺，具体尺寸见图 2.3-75 及表 2.3-19。

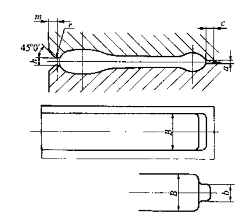


图 2.3-75　滚压模膛的尾部与钳口

表 2.3-19

料头直径 d_p/mm	a/mm	c/mm	r/mm	b/mm
<30	4	20	5	$b=B/2$
30～60	6	25	5	
60～100	8	30	10	
>100	10	5	10	

2）钳口的作用是通过滚压将棒料分成料头和锻坯两部分。料头是夹持部分，切边后与飞边一并切除。钳口太大，使金属过度外流影响聚料效果，且造成金属的浪费。如果钳口太小，夹钳的料头部分承受不了锻件的重量，使操作困难。所以钳口尺寸设计要合理，形状见图 2.3-75 所示，尺寸由下式确定：

$$h=0.2d_p+6\ \text{mm}$$

$$R=0.1d_p+5\ \text{mm}$$

$$m=(1\sim2)\ h$$

式中，h 为钳口高度；R 为钳口与滚压模膛过渡圆角；m 为钳口距模具边缘的距离；d_p 为坯料直径。

有的滚压模膛，大头聚料在前端，杆部作夹持部分，而这部分在滚压模膛之外，不被滚压，这样的滚压模膛可将钳口取消。如图 2.3-76 所示。

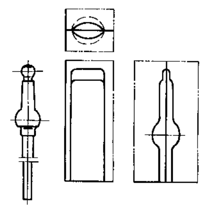
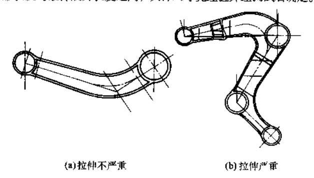


图 2.3-76　无钳口滚压模膛

（5）滚压坯料长度的修正

1）如果滚压后坯料要进行弯曲时，不论弯曲模膛形状如何，坯料都会被拉伸变长。当弯曲后拉伸现象严重时，滚压坯料的长度按弯曲后坯料的水平投影长度来确定。如图 2.3-77 所示拉伸程度不同的两种典型件。

当拉伸现象较小时，可将滚压坯料的长度取在锻件水平投影长度与锻件展开长度之间，具体尺寸凭经验并经调试后确定。



(a) 拉伸不严重　　(b) 拉伸严重

图 2.3-77　拉伸程度不同的锻件

经验表明，滚压坯料长度不宜偏长，略短些为好。

2）滚压坯料直接进行预锻或终锻时，要考虑最初打击位置对坯料伸长的影响。

预锻或终锻模膛中间如有凸台等凸起部分率先与坯料接触，就会不同程度拉伸金属，使料超出原来的需要，这时就应预先将坯料设计得短一些。

对于非平面分模的锻件，头一两次打击，坯料就被明显拉伸，也应将坯料设计得短些。如图 2.3-78，坯料的长度既没有按展开长度设计也没有按锻件水平长度设计，而是比其更短，否则，在第一次受到打击时，两端的金属就被推到模锻模膛之外了。

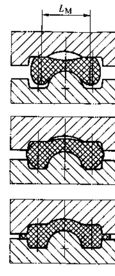


图 2.3-78　非平面分模的锻件

9　压肩模膛设计

压肩模膛也称卡压模膛，它的形状与滚压模膛相似，设计方法也基本相同。区别是压肩模膛在操作时不像滚压那样做 90°的多次翻转，而只作一次打击后直接放入预锻或终锻型槽。压肩模膛的聚料作用比滚压小，而在压下量大的部分则使坯料有明显增宽的效果。

9.1　压肩模膛的型式

压肩模膛也有开式或闭式，开式应用较广，压后坯料平移放入模锻模膛锻造，如图 2.3-79 所示。

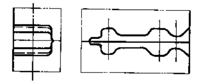


图 2.3-79　开式压肩模膛

闭式模膛多用于圆轴类件，压肩后坯料转 90°放入模锻模膛，如图 2.3-80 所示。

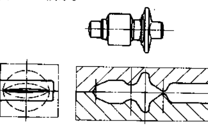


图 2.3-80　闭式压肩模膛

9.2　压肩模膛的尺寸设计

尺寸设计见 8.2 中的计算公式及表 2.3-17（k 值取开式的值），参考滚压模膛的设计原则。

例：凸缘叉压肩模膛，如图 2.3-81 所示，压肩后水平放入终锻型槽。

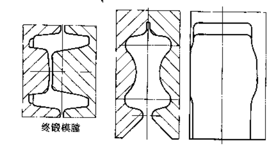


图 2.3-81　凸缘叉压肩模膛

10　弯曲模膛

弯曲模膛的作用是将坯料在弯曲模膛中压弯，使其符合锻件水平投影的形状。

10.1　弯曲模膛纵向截面设计

1）弯曲模膛纵向截面轮廓应根据锻件在分模面上的水平投影轮廓线内以 3～8 mm 作图设计，如图 2.3-82 所示。

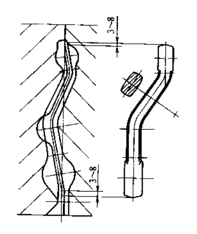


图 2.3-82　弯曲模膛纵向截面

也可用下式计算：

$$h=(0.8\sim0.9)\ b_d$$

式中，h 为模膛高度；b_d 为锻件对应位置的宽度。

2）弯曲模膛凸模顶部圆弧应足够大，而坯料内侧圆弧要大于锻件内侧圆弧。这样在终锻时，坯料两侧排出的飞边向中间汇合形成的折叠不至于延伸到锻件上去，如图 2.3-83 所示。如果内侧圆弧过小，金属汇合后折叠将伸入锻件内侧弯角处，如图 2.3-83a 所示。

虽然坯料弯曲部分的外侧值入终锻模膛内部较多，但由于打击时金属向外流动趋势要比向内流动大得多，所以，一般情况下不会影响弯曲件外侧的充满。

3）设计方法如下。

① 用透明纸覆盖在锻件的投影图上，根据 1）的设计原则，在透明纸上勾画大致轮廓，然后再用圆弧和直线组合成给定的形状。弯曲模膛的外形应当圆滑平顺，避免有急剧的台阶或凸起部分。作图时，圆弧的位置要用标定圆心的方法



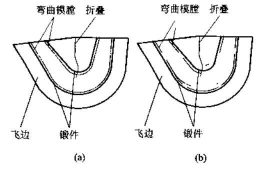


图 2.3-83　飞边汇合形成折叠

确定，尽可能不用相切线作图，避免制造模具时因画线误差而引起偏差。

② 利用 CAD 作图时，可将锻件在分模面的水平投影调出，在与轮廓线不同的层里绘制弯曲模膛的纵向截面，设计步骤按 1) 和 2) 所述进行。

10.2　弯曲模膛横截面形状的设计

对于较小的弯曲模膛，其截面可以简单地做成矩形。如图 2.3-84 所示，对于弯曲较深或较长的模膛，则在模膛凸起部分做出弧形凹槽，见 $E—E$、$F—F$、$b—b$ 截面。

其目的是使坯料压弯时不易偏到一边，起到限位作用。在下模有弧形槽还能对坯料的放置起定位作用，防止坯料放偏或滚落。凹槽的深度（见图 2.3-84 中 $b—b$ 截面）按下式选取：

$$h_1 = (0.1 \sim 0.2)\ h$$

圆弧 R 的大小由三点作圆的方法确定。

在弯曲凹模的最深处，可用圆弧加得更深一些，并做出向外的斜坡，见图 2.3-84 $F—F$ 截面，用来容纳氧化皮并使氧化皮排到模膛外面去。坯料弯曲后的形状仅取决于模膛的凸起部分，所以模膛的加深不会影响坯料的弯曲形状。

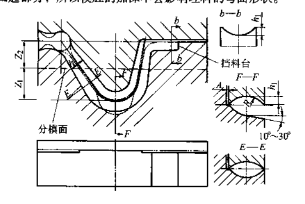


图 2.3-84　弯曲模膛截面形状

10.3　坯料的定位

为了使坯料置入模膛时在长度方向上能够定位，下模应有两个基本处于同一水平位置的支持点。因此通常将凹下部分设计在下模，而将凸出部分设计在上模。

1) 如压弯原棒料，可用挡料台定位，挡料台设置在模膛的后部。

2) 如果坯料是预先经过了拔长或滚压的，多数情况以模膛的钳口颈部定位较方便。如图 2.3-85 所示。弯曲模膛下凹部分的开口处应有不少于 $R10$ mm 的圆角，使坯料在弯曲时不受阻或拉伤。

3) 在弯曲模膛的上半部分，还应根据坯料弯曲时的运动情况和弯曲后的形状挖去可能与坯料发生干涉的地方，见图 2.3-85 中之 A 处。

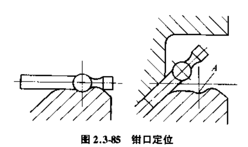


图 2.3-85　钳口定位

10.4　弯曲模膛宽度

弯曲时坯料将被展宽，所以设计弯曲模膛时模膛宽度要留有余地。

1) 一般情况要在坯料最大宽度上增加 10 ~ 15 mm。

2) 公式计算法：

$$B = F_p / h + 10\ \text{mm}$$

式中，F_p 为坯料的截面积；h 为对应的模膛高度。

选几个典型截面计算出结果进行比较，选取最大值作为弯曲模膛宽度。

3) 在有弯曲凸模超过分模面并伸入凹模的部分，应将凹模宽度加大 3 ~ 8 mm，以避免上、下模发生干涉，见图 2.3-84 所示。

10.5　弯曲模膛高度方向的位置

弯曲模膛在高度方向的位置，最好使 $Z_1 = Z_2$，见图 2.3-84 所示，即凸、凹模超过分模面的距离相等，这样可使上下模块的刨或铣削的加工量相等，使上、下模有大致相等的可供翻新的模具高度，以提高模具的使用寿命。

特殊情况：凸模过高，可将凸模做成镶块镶嵌到模体上，减少了整体模块的尺寸，比较经济。

11　切断模膛

切断模膛一般用于一料多件。因锻件较小，使用较长的棒料锻成一件后，需将已锻好的锻件从棒料上剁下来，以便锻造下一个锻件。

切断模膛按其位置和排列可分为三种形式。最常见的多位于模具的右前角和左后角。为了操作方便和合理布排，切断模膛都与燕尾中心线交叉成一个 α 角，α 一般采用 15°、20°、25°三种角度。

1) 前切刀　前切刀指将切断模膛设计在模块的右前侧，其结构如图 2.3-86 所示，其尺寸是根据带有飞边的锻件来设计的。在模膛的水平方向，锻件的最大凸出部分不应碰到模膛的侧壁。在模膛的垂直方向，应使模膛的底部在剁断时碰不到飞边。如果飞边被压而变形，就会给切边定位造成很大困难。所以在设计切断模膛时，必须保证在切断过程中锻件和飞边不受打击或被碰坏。

2) 后切刀　后切刀指切断模膛设计在模块的左后侧，其结构形式如图 2.3-87 所示，其尺寸主要根据坯料的直径来设计。模膛的宽度和深度应能使坯料自由地放入。因为后切刀较浅较窄。所以这种模膛比较坚固。

前切刀和后切刀尺寸除按图 2.3-86 和图 2.3-87 设计外，其宽度 B 和深度 h 可按表 2.3-20 选取。

3) 混合式切刀

① 混合式切刀的型式　混合式切刀是把切断模膛和滚压模膛合并在一起，如图 2.3-88 所示。把切断模膛设计在滚压模膛的后面，在第二个锻件滚压的第一次锤击时，同时将第一个锻件切断下来，这样即可以提高生产率，还可以节省单独切断模膛的位置，减小模块尺寸。

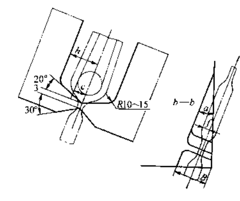


图 2.3-86　前切刀

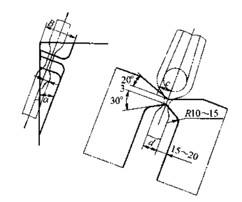


图 2.3-87　后切刀

表 2.3-20　切刀尺寸

锻件尺寸 c 或 f/mm	切刀尺寸/mm	
	h	B
<10	50	50
10~20	60	50
20~30	70	60
30~40	80	70
40~50	90	80

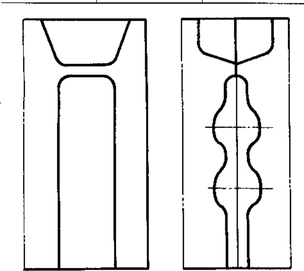


图 2.3-88　混合式切刀

② 适用范围。混合式切刀适用于较小的并且一料多件的锻件。

③ 混合式切刀设计原则。按前切刀设计要求进行设计，应使切断时锻件和飞边不受打击。

12　镦粗台与压扁台

12.1　镦粗台的作用与尺寸设计

镦粗台也称镦粗模膛，它的作用是沿着轴线镦锻坯料，使坯料的直径增大，便于锻件的成形。

几乎所有的齿轮、凸缘、法兰等短轴类锻件都要经过镦粗制坯再进行模锻，经镦粗后的坯料不仅能使其在模膛中放稳，而且易于充满模膛，减少了模膛的打击次数，延长了模锻模膛的使用寿命。此外，坯料加热时形成的氧化皮（特别是煤气炉加热，氧化皮很厚），也能在镦粗时被撑离剥落，避免掉在模锻模膛内嵌入锻件，影响锻件尺寸和表面质量。

镦粗台的设计主要是确定镦粗台的高度、大小及镦粗台在模块上的位置。

首先，要确定镦后坯料的直径。直径的确定有以下几点要求。

1）如果锻件类似图 2.3-89 所示的齿轮类，则要使镦后坯料直径 $D_2 < d < D_1$，一般 $d = (D_1 + D_2)/2$ 以防止终锻时直径过小而在轮缘上出现折叠或充不满。

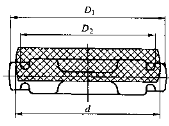


图 2.3-89　坯料直径在轮缘之间

2）如果锻件类似图 2.3-90 所示的锥形齿轮，为使锻件易充满，应使坯料直径 d 接近下模直径 D，将坯料放入终锻模膛时，能够容易观察坯料是否处于中心位置。

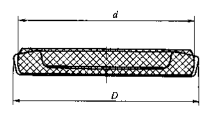


图 2.3-90　坯料直径接近锻件外径

其次，根据确定了的坯料直径，计算镦粗台的高度——即镦后坯料的高度。公式如下：

$$h = 4V_p/\pi d^2$$

式中，V_p 为坯料的体积，$V_p = (V_{冷锻} + V_{飞} + V_{连}) \times 1.046$；$d$ 为坯料镦粗后的直径。

最后，还要计算一下镦粗比。若锻件为突缘类锻件，如图 2.3-91 所示，则要考虑坯料的高度 h 能够保证突缘凸台部分能够充满，一般可使 h 比凸台高度大 5%~15%，这种情况则先定高度 h，再计算镦后坯料直径。

12.2　镦粗台在模块上的位置

1）镦粗台的宽度应比镦粗后的坯料直径大出 20~40 mm，如图 2.3-92 中 c = 10~20 mm。

2）镦粗台一般位于模块的左前角或右前角，我们常用于左前角。镦粗台过于偏离打击中心对于模具的强度来说是危险的，特别是对于镦粗直径很大的锻件，为此，镦粗台的

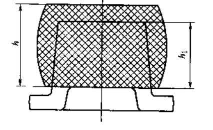


图 2.3-91　坯料高度要保证凸台充满

位置还应使终锻模膛中心符合

$$b_1/b<1.4 \text{ 及 } l_1/l<1.4$$

的规定。如图 2.3-92 所示。

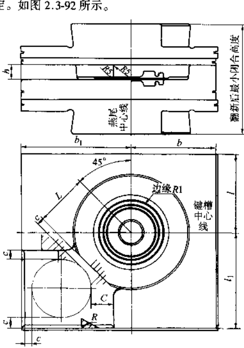


图 2.3-92　镦粗台

3）镦粗台的边缘应成圆角 $R=8\sim10$ mm。

12.3　压扁台

压扁台用来将坯料的截面压扁增宽，主要用于扁宽的锻件。

通常压扁后的高度由操作者在操作时自行控制，在模块上留出足够的压扁面积即可，见图 2.3-93 所示，这样可使模块有足够的承击面，减少模块尺寸。

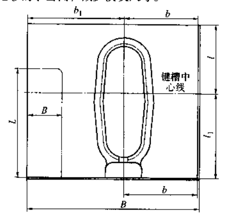


图 2.3-93　压扁面

13　锻模结构

13.1　模膛的排列

模膛的排列包括终锻模膛、预锻模膛及各制坯模膛位置的确定及其相互位置的确定。它的位置对锻件质量、操作的方便性及生产效率有着很大的影响。

1）锻模中心与模膛中心。锻模中心是锻模燕尾中心线与键槽中心线的交点，当锻模固定在锤上时，锻模中心即与锤杆中心重合，因此锻模中心就是锻锤的打击中心。如图 2.3-94 所示。

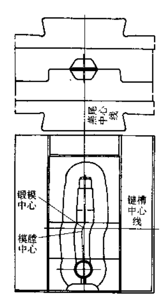
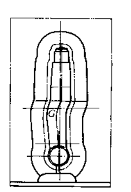


图 2.3-94　锻模中心与模膛中心

模膛中心是指锻打时金属在终锻模膛中变形抗力合力的作用点，见图 2.3-94。求出模膛中心的准确位置是困难的，但对平面分模的锻件，可近似地认为模膛中心就是模膛（包括飞边桥部）在分模面上投影面积的面心 G，见图 2.3-95。根据锻件形状不同，模膛中心可在模膛轮廓之内，也可能在模膛轮廓的外边。求模膛中心有图解、计算等多种方法，常用的有样板实测法、计算机辅助计算法两种。特别对于形状复杂的锻件，用样板实测法可很方便地求出。



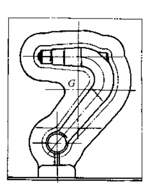


图 2.3-95　模膛中心

样板实测方法如下：将模膛轮廓（包括飞边桥部）画在厚纸板上剪下；在板上面任选两点 A、B；用大头针依次穿过 A、B 点，将样板吊起作铅垂线（必须保证样板在 A、B 点能自由摆动）；两条铅线的交点 G 为所求出的模膛中心。如图 2.3-96 所示。

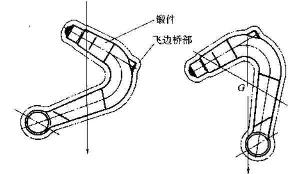


图 2.3-96　用样板实测法确定模膛中心

2）确定终锻模膛位置的一般原则。对于水平分模的终锻模膛，模膛中心应尽量与锻模中心重合或接近锻模中心。模膛中心偏离锻模中心将使锻造时产生偏心力矩，引起锻模的错移。模膛中心偏离越远，产生的错移也越大。上模错移的方向与模膛中心偏移的方向一致。如图 2.3-97 所示。

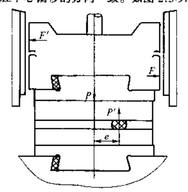


图 2.3-97　偏心力矩引起错移

对于带落差的锻件，锻件斜面上的模锻变形抗力有相当大的水平分力 F，如图 2.3-98 所示。分力 F 将使模具产生错移，使平衡锁扣产生剧烈磨损，严重时甚至将锁扣打裂。为了抵消分力 F 的影响，需将模膛中心特意偏离锻模中心，利用这个偏离产生的偏心力矩来消除或减小水平分力的作用。模膛中心偏移的方向如图 2.3-99 所示，即模膛中心应朝着下模斜面升高的方向偏移，偏移的距离 S 可按下式计算：

$$S=(0.2\sim0.4)h$$

式中，h 为斜面的高度。

当锻件斜面部分面积较大时，或对锻件错差要求严时，取式中较大的系数。

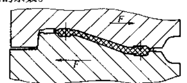


图 2.3-98　斜面对错移的影响

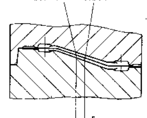


图 2.3-99　用模膛中心偏移抵消斜面的影响

3）终锻模膛与预锻模膛的布置原则。当预锻模膛和终锻模膛同时存在时，两个模膛的布置要兼顾，一是在模壁强度允许的条件下两个模膛尽量靠近；二是终锻模膛要比预锻模膛更加靠近模锻中心。

终锻模膛中心至锻模中心的距离一般是预、终锻模膛间距的 1/3，而预锻模腔中心至锻模中心的距离则是预、终锻模膛中心间距的 2/3。如图 2.3-100 所示。

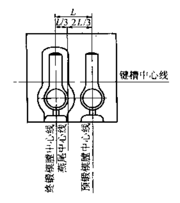


图 2.3-100　终锻与预锻模膛的布置

当预锻模膛中心偏离锻模中心较大时，仍然应将模膛中心控制在燕尾承击面之内，即保证 $L<b$，如图 2.3-101 所示。如果模膛中心超出燕尾承击面，有将锻模打裂的危险。

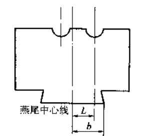


图 2.3-101　模膛中心不应超出燕尾承击面

终锻模膛与预锻模膛在模块平面上布置有三种方式。

① 同向排列，如图 2.3-102 所示。

两个模膛方向相同，模膛中心均在锻模键槽中心线上，采用这种排列可使锻模前后方向的错差比较好控制，操作方便，是最常用的布置方法。

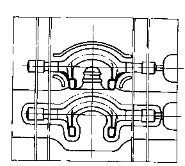


图 2.3-102　同向排列

② 反向排列，如图 2.3-103 所示。

两个模膛的中心都在键槽中心线上，但预锻模膛与终锻模膛相反方向布置。这样可使两个模膛靠近，减少模膛中心偏离燕尾中心的离距离。但锻打时需将预锻件翻转 180°放入终锻模膛，操作也比较方便。对于局部不易充满的锻件，也可以利用这种布置的特点。

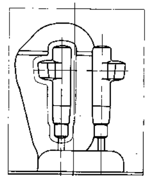


图 2.3-103 反向排列

③ 前后错开排列，如图 2.3-104 所示。

用来布置宽度大而长度较小的锻件，要求预锻做得圆浑些，防止终锻时产生折叠。

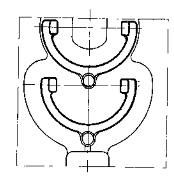


图 2.3-104 前后排列

4）关于模膛的预错。由于预锻模膛受力比终锻模膛小，而且必须更严格地控制终锻的错移，所以一般预锻模膛比终锻模膛更为偏离锻模中心。预锻产生的错移较大，可能导致终锻时产生折叠和充不满。为此可在预锻模膛上作出预先的反向错移量 Δ。如图 2.3-105 所示。在模膛中心偏移大于 60 mm 时作出预错。预错量 Δ 一般为 1～4 mm，根据经验确定。

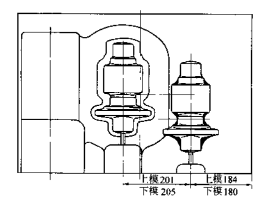


图 2.3-105 预锻模膛的预错

5）制坯模膛的布置原则

① 模膛的位置应与加热炉、切边压床的位置相适应，第一个制坯模膛应靠近加热炉一侧，使得操作方便，特别是两个工人同时操作时。

② 模膛应尽可能按工步顺序排列，以减少坯料往返移动的次数，减轻操作者的劳动强度。

③ 在左侧拔长时，采用斜式拔长模膛以使操作比较方便。

④ 弯曲模膛的位置应与预锻或终锻模膛相适当，弯曲后的坯料能顺利地翻入预（终）锻模膛。如图 2.3-106 所示。弯曲模膛的位置和其上下方向，应该从操作方便的角度反复比较利弊后决定。

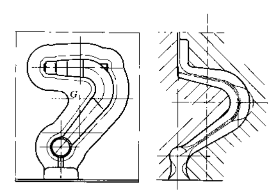


图 2.3-106 弯曲模膛的位置

13.2 错移力的平衡与锁扣设计

由于锻件形状、模膛的布置及设备等因素的影响，锻打时上、下模常会产生错移，锻模错移将造成锻件错差，降低了锻件精度，加速锻锤导轨磨损并导致锤杆过早折断，所以需要在锻模上设计锁扣以平衡错移力。

锻模锁扣有两种基本类型，一种是由锻件弯曲分模面自然构成的锁扣称形状锁扣，另一种是水平分模面锻模的普通锁扣。

（1）形状锁扣的设计

形状锁扣的设计取决于锻件分模面的形状。

1）当锻件分模面的落差不太大时，将锻件两个端点在同一水平面上，算出锻件侧斜放置的夹角 α，$\tan\alpha = H/L$，其中 L 值应包括拔模斜度在分模面上增加的长度。如图 2.3-107 所示，由于锻件的斜置，使其自然抵消了锻模的错移。一般情况应符合 $\alpha \leqslant 7°$，如果 α 过大，将使锻件出模不利，要加大锻件两端的拔模角，使锻件外形改变，L 值也随其发生变化。

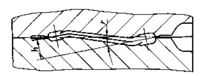


图 2.3-107 锻件斜置

2）当锻件分模面落差 H 值较大时，应设置平衡锁扣来对抗水平错移力，如图 2.3-108 所示。锁扣高度可与锻件的落差相等，必要时也可以大于或小于落差，锁扣厚度 $b \geqslant 1.5H$，模块尺寸足够大时，最好使 $b \geqslant 2H$。

α 角可根据 H 值确定：

当 $H = 15～20$ mm 时，$\alpha = 5°$

当 $H = 30～60$ mm 时，$\alpha = 3°$

锁扣间隙应小于锻件允许错移值的二分之一。通常我们选用 0.3 mm，并注明在上（或下）模做出，一般在凸起的一面做出。

沿锻件中心线分模导面上也应注明间隙要求，通常我们注明：导面间隙不大于 0.2～0.3 mm 如图 2.3-108 所示。导面上的飞边仓部要足够大，以容纳多余的金属。为了不致将飞边嵌入锁扣，有时将做出飞边槽的型式。锁扣纵向应留有间隙，一般 3～5 mm，以免上、下模发生干涉。

3）当锻件分模面落差 $H > 50$ mm 时，可将锻件倾斜一个角度后再设置平衡锁扣，这样即可以降低锁扣高度，节省锻模材料。

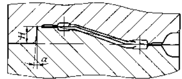
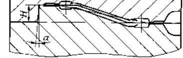



图 2.3-108 锻件平置设锁扣

其他参数如 2) 中所述。

4) 当锻件上的分模面具有对称形状或将有落差的小锻件作对称排列时，错移力可以自行抵消，如图 2.3-109 所示。这种情况可以不设置平衡锁扣，导面形状由锻件分模面形状决定。

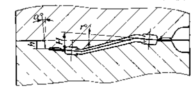


图 2.3-109 锻件斜置设锁扣

(2) 普通锁扣的设计

大多数锻件是水平分模的，有的锻件精度要求较高，也要设置锁扣，即普通锁扣。

1) 采用锁扣的几种情况

① 对锻件错移要求较严，如一模多件、冷切边的锻件以及要求错移量不大于 0.5 mm 的锻件。

② 容易产生错移的锻件，如长杆件、形状复杂以及模膛中心偏离锻模中心较大的件。

③ 从直观上不容易发现错移以及锻后不立即进行切边也难以发现错移的锻件。如图 2.3-110 所示。

2) 采用锁扣的缺点

① 增加了模块高度和面积，增加模具费用。

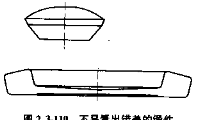


图 2.3-110 不易看出错差的锻件

② 减少了模具的承击面，使模具寿命降低。

③ 增加了模具制造工时。

④ 由于锁扣的角度 α 小，容易磨损，模具翻新时的下落量增大，减少了翻新使用次数。因此，对于水平分模的锻件，是否采用锁扣，必须权衡利弊后再决定。

3) 普通锁扣的几种型式

① 圆形锁扣。主要用于镦粗成形的短轴类锻件，圆形锁扣的一般型式见图 2.3-111 所示，尺寸见表 2.3-21。

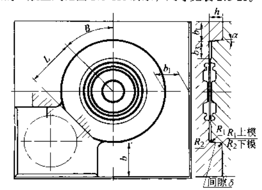


图 2.3-111 圆形锁扣

表 2.3-21 圆形锁扣的尺寸

mm

锻锤吨位/t	h	b	b_1	α	b_3	R_1	R_2
1	25	50	>35	5°	40	3	5
2	30	60	>40	5°	50	3	5
3	35	70	>45	5°	60	3	5
5	40	80	>50	3°~5°	70	5	8
10	50	100	>60	3°~5°	75	5	8
16	60	120	>75	3°~5°	80	5	8

锁扣的凹下部多放在下模，凸起在上模，这样使坯料摆放和锻件起模较方便。

采用锁扣时，为避免飞边嵌入锁扣间隙，应将仓部尺寸，加宽 5~10 mm。

锁扣角度 $\alpha=3°\sim5°$，锁扣间隙 $\delta=0.2\sim0.4$ mm，通常选用 0.3 mm，并在上模做出。

② 纵向锁扣。主要用于长轴类锻件以限制其左右错移，防止长轴类锻件转动，在两端产生较大的错移。纵向锁扣的型式见图 2.3-112，尺寸见表 2.3-21。当有制坯模膛时，尺寸 b 按需要放大。

为方便操作，将锁扣凸起部做在下模。锁扣各侧面间隙 0.3 mm 做在下模（凸起部）注明两个平面的密合度 0.1~0.3 mm。如图 2.3-112 所示。

③ 侧面锁扣。主要用于小型锻模及单模膛锻模，它能够限制左右、前后两个方向的错移。这种锁扣对承击面的影响较小，但强度较纵向锁扣低，如图 2.3-113 所示。尺寸参照表 2.3-21，锁扣长度约为模块长度的二分之一，设在模块两侧中部。

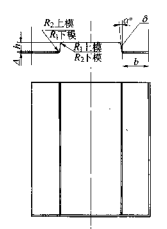


图 2.3-112 纵向锁扣

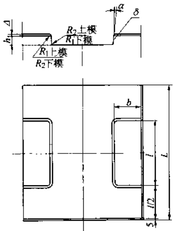


图 2.3-113　侧面锁扣

为使锁扣处不积存氧化皮，一般将凸部做在下模。

④ 角锁扣。主要用于小型锻模或单模膛锻模，锁扣设置在锻模的四个角上，见图 2.3-114 所示。锁扣尺寸参照表 2.3-22。

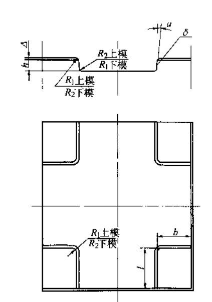


图 2.3-114　角锁扣

表 2.3-22　锁扣尺寸　mm

锻锤吨位/t	h	b	l	α	R_1	R_2	R_3	R_4
1	25	50	75	5°	3	5	8	10
2	30	60	90	5°	3	5	8	10
3	35	70	100	5°	3	5	10	15
5	40	80	120	3°~5°	5	8	15	20
10	50	100	145	3°~5°	5	8	20	25

角锁扣的凸起部分一般也做在下模。

13.3　模膛的壁厚

(1) 确定模膛壁厚的原则

1) 模膛越深，侧壁斜度越小，壁与底部的圆角半径越小，壁厚越大。

2) 与模膛相邻的壁面斜度越小，壁厚越大，如相邻的是锻模外壁（斜度为零），则壁厚应最大。

3) 其他条件相同时，模膛的平面形状对壁厚的影响不同。如图 2.3-115 所示，a、b、c 的壁厚应依次增大。

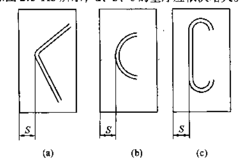


图 2.3-115　三种模膛平面形状

(2) 不同模膛壁厚的确定

1) 模膛至模块边缘的壁厚。

① 当 $\alpha = 7°$，$R = 3$ mm 时，壁厚 S(mm) 可根据模膛深度 h 确定，如式计算：

$$S = K_1 h$$

式中，K_1 为系数，按表 2.3-23 选用。

表 2.3-23　系数 K_1

模膛深度 h/mm	<20	20~30	30~40	40~55	55~70	70~90	90~120
K_1	2	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0

② 当 α 和 R 较大时，模膛平面形状如图 2.3-118 中 a、b 情况时，壁厚可适当减小。

2) 终锻模膛与预锻模膛之间的壁厚。

① 当 $\alpha = 7°$，$R = 3$ mm，壁厚 S（mm）右根据模膛深度 h 确定，按下式计算：

$$S = K_2 h$$

式中，K_2 为系数，按表 2.3-24 选用。

表 2.3-24　系数 K_2

模膛深度 h/mm	<30	30~40	40~70	70~100	100~150
K_2	1.5	1.3	1.1	1.0	0.8

② 当 α、R 较大时，壁厚可适当减小。

3) 一模多件锻造时，相邻模膛受力均衡，壁厚 S（mm）按下式确定：

$$S = (0.5 \sim 1)\ h$$

如图 2.3-116 所示。

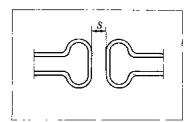


图 2.3-116　一模多件模膛壁厚

这种情况下确定 S 值时还应考虑切边凹模刃口的宽度。

4) 制坯模膛的壁厚　由于拔长、滚压、弯曲等制坯模膛受力小，壁厚也可设计小些，其最小壁厚应为：

$$S_{min} = 5 \sim 10 \text{ mm}$$

5) 模锻模膛至钳口的壁厚　见 6.2 钳口尺寸的确定。



13.4 锻模承击面

当锻模受力时，模块被弹性地压缩、下沉，所以模块应该有足够的接触面来阻挡模面的下沉，这个接触表面称为承击面。

承击面是由模块分模面的面积减去模膛、飞边槽、锁扣等占用面积后的面积差。

这样计算出来的面积应大于最小承击面值。最小承击面值与锤的吨位有关，见表 2.3-25。

表 2.3-25 最小承击面与锤吨位的关系

锻锤吨位/t	1	2	3	5	10	16
最小承击面/cm^2	300	500	700	900	1 600	2 500

锻模设计完成的，设计者必须计算承击面是否大于最小承击面的值，若小于最小承击面值，则要加大模块尺寸，增加承击面。

14 模块尺寸的确定

(1) 确定模块尺寸的根据与步骤

1) 模块尺寸是根据所采用的型槽数量、尺寸、布排与最小壁厚等进行设计并确定尺寸。

2) 合理地安排锻模打击中心与模块中心之间的偏移量与承击面。

3) 按照设备工艺规格，使模块尺寸最大宽度与长度，最小高度在允许的范围内。

4) 根据以上因素所确定的初步尺寸，按 25 mm 一挡选取接近的模块尺寸。

(2) 确定模块尺寸的因素

1) 锻模中心与模块中心的偏移量不能过大，使 $b_1/b \leq 1.4$，$l_1/l \leq 1.4$。见图 2.3-92 所示。

2) 锻模承击面的要求，见 13.4 所述的内容。

3) 锻模宽度尺寸。

① 最大宽度尺寸 锻模最大宽度尺寸应使上模与模锻锤导轨之间有必要的间距，使模块最大宽度 $B_{max} \leq B - 40$ mm。见图 2.3-117 所示。

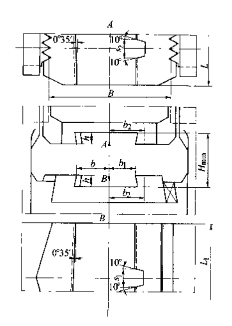


图 2.3-117 模锻锤的装模空间

② 最小宽度尺寸。锻模最小宽度尺寸大于燕尾宽度。至少每边要大于 10～20 mm。见图 2.3-118 所示。

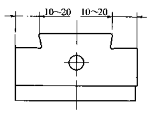


图 2.3-118 模块最小宽度

4) 模块长度 模块的最大长度应使模块悬空在夹持器外的部分长度 $f \leq H_1/3$。见图 2.3-119 所示。

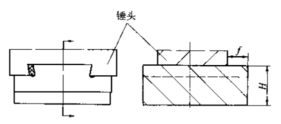


图 2.3-119 模块最大宽度

5) 模块高度 常用的规格有：250、300、350、375、400、425 mm。按 25 mm 一挡，同时要考虑模块翻新后的最小闭合高度。最小闭合高度根据设备工艺规格确定，见表 2.3-26 所示。

表 2.3-26 闭合高度

锻锤吨位/t	1	2	3	5	10
H_{min}/mm	320	410	464	564	600
H_{max}/mm	500	600	650	750	850

注：H_{min}为允许的最小闭合高度；H_{max}为允许的最大闭合高度。

15 锻模的一般要素

1) 燕尾及键槽 锻模的燕尾及键槽通过定位键、固紧楔、垫片等与锤头及砧连接，如图 2.3-120 所示。

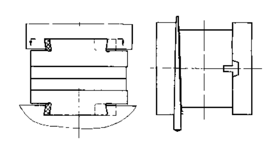


图 2.3-120 锻模与锤的连接

燕尾及键槽根据模锻锤的工艺规格设计，如图 2.3-121 所示，按表 2.3-27 选取。设计锻模时，通常不注明燕尾及键槽尺寸，只需标出其代号即可。

表 2.3-27　燕尾、键槽与起重孔尺寸　mm

锻锤吨位/t	燕尾级别代号	燕尾			键槽		起重孔
		B	h	h_1	L	A	$d\times l$
1	No1	200	50.5	75	60	50	26×60
2	No2	260					26×80
3	No3	300	65.5	85	75	75	
5							
10	No5	400	80.5	120	90	100	40×100
16							

燕尾高度应比锻锤燕尾槽深度大 0.5～1 mm，以保证燕尾平面不致悬空，否则锻模易破裂。

燕尾与锻模肩部过渡处的圆弧应适当，避免与锤头或砧座相干涉。圆弧上不允许有明显的加工痕迹，以免产生应力集中。

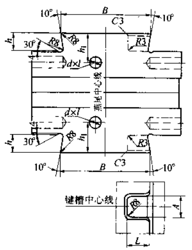


图 2.3-121　锻模的燕尾及键槽

2）检验角和检验面　为了给制造锻模时的划线作基准并作为上、下模对齐的基准，锻模上设置检验角。检验角是锻模侧面上由两个加工表面构成的 90°角。构成检验角的表面叫检验面，如图 2.3-122 所示。

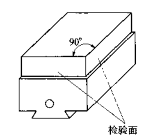


图 2.3-122　检验面与检验角

检验角一般设在模块的前左侧或前右侧（根据模膛排列情况置于模膛敞开部分较少的一边）。检验面要求刨平，刨进深度 5 mm。

在锻模翻新到最小闭合高度时，检验面的高度应保证每块锻模上余有 30 mm 高的平面。

3）起重孔　起重孔供起吊锻模用，参见图 2.3-121 和表 2.3-27。

锻模重量 < 800 kg 时，只在锻模前后端各钻一孔；锻模重量 ≥800 kg 时，应在锻模左右各增加两个孔。

4）定位键、固紧楔、垫片等按标准选取。

16　锻模的加工精度及粗糙度要求

1）锻模的加工精度。一般锻模型槽尺寸的加工精度在图样中不注明，加工时按照表 2.3-28 中的规定进行加工。其他尺寸加工精度见图 2.3-123 所示。

表 2.3-28　加工精度　mm

尺寸	终锻型槽			预锻型槽			制坯型槽		
	深	宽或直径	长	深	宽或直径	长	深	宽或直径	长
<20	+0.2 0.1	+0.3 -0.1		+0.3 -0.2	+0.5 -0.2	±0.5	+2.0 -1.0		
20～50	+0.25 -0.15	+0.4 -0.2	+0.4 -0.2	+0.4 -0.2	+0.6 -0.3	+0.6 -0.3	±0.6	+3.0 -1.5	±1.0
50～80	+0.3 -0.2	+0.5 -0.3	+0.5 -0.2	+0.5 -0.3	+0.7 -0.4	+0.7 -0.4	±0.8	+3.0 -1.5	±1.2
80～160	+0.4 -0.3	+0.6 -0.3	+0.5 -0.3	+0.6 -0.3	+0.8 -0.4	+0.8 -0.4	±1.0	+4.0 -2.0	±1.5
160～260		+0.6 -0.4	+0.6 -0.3		+1.0 -0.5	+1.0 -0.5		+5.0 -2.0	±1.8
260～360		+0.7 -0.5	+0.7 -0.3	+1.0 -0.5		+1.0 -0.5			±2.0
360～500			+0.8 -0.4			+1.2 -0.5			±2.5
>500			+0.8 -0.5			+1.2 -0.5			±3.0

注：型槽深度从分模面算起。

2）锻模的粗糙度　锻模及其型槽的粗糙度如图 2.3-123 所示。

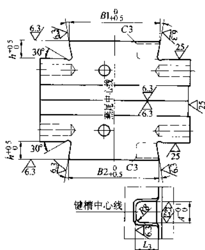


图 2.3-123　锻模的加工精度

17　锻模材料及热处理

用于锤锻模的材料很多，常用的材料及其热处理要求见表 2.3-29。

表 2.3-29　锻模材料与热处理

钢　号	热处理要求			硬度值	
	淬火温度 /℃	一次回火温度 /℃	二次回火温度 /℃	HB	HRC
5CrNiMo	880	500		375 ~ 442	40 ~ 46
4Cr5MoSiV1	1 040	610	600		
3Cr2MoVNi	1 000	620	600	375 ~ 442	40 ~ 46
4Cr2MoVNi－0＃	910	590	580	323 ~ 360	35 ~ 39
4Cr2MoVNi－7＃	960	600	580	323 ~ 360	35 ~ 39

18　典型锻件锤模锻示例

例 1　开口万向节叉（一模两件，滚压、预锻、终锻，1 t 模锻锤）如图 2.3-124 所示。

例 2　转向节上臂（由于截面差小，采用弯曲、终锻，2 t 模锻锤）如图 2.3-125 所示。

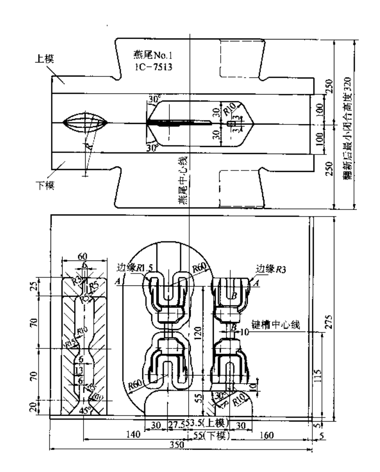


图 2.3-124　开口万向节叉



图 2.3-125 转向节上臂

19 高速锤上闭式模锤

19.1 高速锤闭式模锻的特点及模锻工艺制定

与其他模锻设备上的闭式模锻比较，高速锤闭式模锻的优点是能模锻出薄肋、薄壁、薄腹板、小圆角半径和小模锻斜度的锻件，并且由于提高了金属材料利用率降低了劳动量，可取得良好的技术经济效果。

制定高速模锻工艺方案和制定其他变形工艺方案一样，包括以下主要内容：绘制锻件图和选择变形方式（开式模锻或是闭式模锻）；计算模锻时的动力参数和选择适当功率的锻锤；计算单工步的原始毛坯尺寸和多工步模锻时每一工步的异形坯料尺寸；根据材料牌号、原始毛坯尺寸和锻件的生产批量选定加热规范和加热设备；选择润滑剂和从锻件上清除氧化皮、油垢及其他污物的方法。

1）制定锻件图。根据高速锤模锻的特点和可能性制定的锻件图，可确定不需进行机械加工的表面，对其余表面则要规定机械加工余量。切削加工余量及锻后加工表面和不加工表面的公差均按粗糙度 $R_a = 20 \sim 10$ μm 进行规定。制定钢、钛、热强合金和铝合金锻件图时，必须遵守表 2.3-30 和表 2.3-31 所列锻件结构部分的极限值。

高速变形可保证所得热强钢和不锈钢及钛合金锻件表面粗糙度 $R_a = 2.5 \sim 1.25$ μm 和 $R_x = 20 \sim 10$ μm，而铝合金的 $R_a = 1.25 \sim 0.32$ μm。冲孔前对孔和连皮要做标记，标记的方法和普通锻造一样。有时模具上没有脱模器，就把锻件上端的标痕深度减小，否则锻件会卡在冲头上。

2）确定变形方案及工艺参数。根据锻件的类型、填充模腔时金属的流动方向、流线分布的要求、锻件重量和金属材料利用率来选定变形方案。用高速模锻方法模锻难变形材料时，模锻前的坯料准备要比普通模锻的仔细一些。高速锤模锻必须严格遵守模锻温度范围。选择温度的主要依据是零件的晶粒度和力学性能（强度、塑性和冲击韧度）。模锻铝合金时，为了避免高速模锻时的过热，模锻温度要比在普通模锻锤和压力机上模锻时的温度（460℃）低 100～130℃。

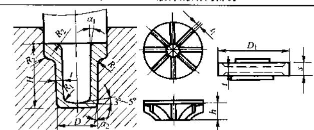
高速锤锻件具有等轴细晶粒致密组织，与普通模锻锤锻件相比，其力学性能要高 10%～15%。高速锤模锻的一次打击可以使金属得到很高的变形程度（超过 30%），获得细晶粒组织，但因变形时间极短（约 0.005 s）以及锻件的薄截面在模具中迅速变冷，使再结晶过程来不及进行，因面保留了变形组织。

3）变形能量计算。高速锻锤是根据放置模具的模锻空间和模锻锻件所需的能量选定的所需的打击能量 E 可按下式计算：

$$E = KeV$$

式中，e 为单位变形能量（可由与每种牌号材料的变形程度有关的曲线图中找到），N·m/cm³；V 为坯料体积，cm³；K 为

表 2.3-30 锻件的结构部分



结构部分名称	结构部分的极限值/mm≥	结构部分名称	结构部分的极限值/mm≥
$h/t_1 \leqslant 40$ 时的肋厚度 t_1	1.2~2	外圆 R_2	2
$H/D \leqslant 2$ 时的壁厚度 t	2	模锻斜度：	
$D_1/t_1 > 30$ 时的腹板厚度 s	3	内 α_1	0.5~1
圆角半径：		外 α_2	0~0.5
内圆 R_1	3		

表 2.3-31 M7352Б 型高速锤所制锻件各部分的极限值 mm

锻件部分	有色金属	不锈钢	锻件部分	有色金属	不锈钢
最大直径	300	250	最小圆角半径		
最大高度	260	200	外圆	0.5	1.0
肋的最小厚度 t	1.2	1.5	内圆	2	3
肋的最大高度	45 t	20 t	机械加工余量	1.5~2.0	1.5~2.0
腹板的最小厚度	2	4			

锻锤打击有效系数决定的系数，$K = 1.2 \sim 1.4$。

如果模锻形状复杂的锻件所需要的能量超过计算值，则计算打击能量时必须考虑锻件复杂系数 K_1，$K_1 1.5 \sim 2.5$，即

$$E = K_1 KeV$$

按上述公式确定形状复杂锻件的打击能量时，应将锻件的镦粗和挤压部分分开计算，然后再相加。由于作用时间短，真实的模锻力很难测定。但已知变形锻件所需的能量和上模的工作行程，则平均模锻力 P 为

$$P = E/L$$

式中，L 为上模的工作行程。

根据平均模锻力就可确定冲头端部或镶块的单位平均模锻力。模壁上的单位模锻力与冲头上的单位模锻力大致相等，模套的尺寸由模具的计算强度来确定。

19.2 高速锤模锻的典型锻件及其基本工艺参数

高速锤上模锻的一些典型难变形材料锻件如图 2.3-126 所示。所需的基本工艺参数列入表 2.3-32 中。从表 2.3-32 中所列工艺参数可以看出，高速锤模锻所需要的气体压力和打击能量是不同的，并取决于下面的诸因素：坯料尺寸、材料性质、锻件形状和尺寸、模锻温度。

为了使高速锤安全工作，变形时的打击能量 E 应按模具的工作行程 L 来选定（图 2.3-127）。高速锤模锻的原始坯料尺寸应按填充模腔的方法来选定，如果用镦粗方式填充模腔则取原始坯料的高径比 $H/D = 0.8 \sim 2.0$；如果用挤压模锻的方式填充模腔，则取 $H/D = 0.2 \sim 1.0$。为预防形成折叠和穿流，镦粗时坯料的横截面尺寸覆盖住凹模和冲头端部轮廓。

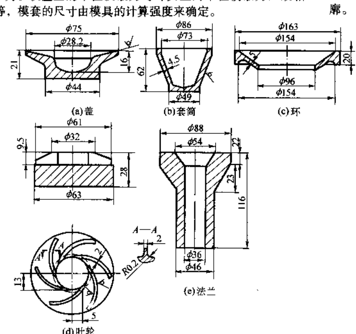


图 2.3-126 M7352Б 型高速锤所制的典型锻件

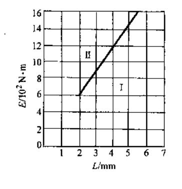


图 2.3-127 M7352Б 型高速锤模锻时打击能量 E 的变化与变形工作行程 L 的关系

Ⅰ—工作区；Ⅱ—非工作区

表 2.3-32　模锻典型锻件所需的基本工艺数据

锻件名称	材料牌号	坯料尺寸（$d\times l$）/mm	锻件的最大外轮廓尺寸($d\times h$)/mm	模锻温度/℃	气体（氮气）压力/kPa	打击能量/J	对击速度/m·s^{-1}
盖	AB	40×42	75×21	300	700	12 000	5.0
套筒	12X18H9T	48×44	86×62	1 160	5 000	88 000	14.5
环	12X17Г9AH4	160×120① ×20	163×27	1 160	5 000	88 000	14.5
桨叶式叶轮	AB	ϕ62×30	ϕ63×28	300	1 500	28 000	7.5
法兰	12X21H5T	87×44① ×58	88×116	1160	4 700	85 000	14.0

① 坯料内径。

难变形材料，特别是热强合金和钛合金坯料，模锻前应将模具预热到 200～300℃。

制定工艺过程时应注意按表 2.3-33 选定容许和临界的变形程度和极限流动速度。

19.3　模具设计和制造特点

根据模锻件的形状和规定的变形方式来确定模具的结构型式。因高速锤模锻时模具在瞬间内要承受很大的载荷，所以模具应为刚性结构，零件数量尽量减少并且没有应力集中。

高精度锻件最好采用预应力结构闭式模具制造。在 M7352Б 型高速锤上模锻各种类型锻件用的闭式锻模结构，如图 2.3-128～图 2.3-131 所示。对模具装置提出的要求是：结构简单，安装和调整方便，固定可靠，有足够的强度。在模锻形状复杂的锻件时，即需要小的打击能量，或者反之在很短的变形行程内释放出很大的能量时，模具和锻锤的零件中将产生相当大的内应力，使锤头可能发生跳动，锤头的跳动和锤的连击可能造成模锻件的报废。因此锻件的肋应在下半凹模内成形。

必须考虑到，用 70% 以上的变形程度在闭式模具中模锻形状复杂的锻件时，冲头和凹模之间所形成的飞边可能会焊死在冲头上，这会导致模具迅速磨损和每次打击后需要进行清理，如果锻件非加工表面的部分或机加工余量最小的表面需要用冲头成形的话，将模锻的温度降低并将冲头和凹模之间的单边间隙由 0.1～0.2 mm 加大到 0.4～0.5 mm，就可消除焊合现象。增大间隙会使端部飞边加厚，易于脱离冲头面留在锻件上。加厚的端部飞边可用砂轮打磨或用切削加工方法切除。把冲头头部倒成 C2 的倒角也能消除焊合现象。填充冲头倒角区的金属温度低于基体金属，这样就减少了流入冲头与凹模之间所形成的间隙中的飞边。变形时在该处作用力施加方式也会对减少飞边的流出的影响。

表 2.3-33　高速模锻难变形材料的变形程度和极限流动速度

材料	临界变形范围/%	推荐的变形程度范围/%	极限流动速度/m·s^{-1}
12XH3A、30XГCA、40XH$_2$MA、10X13、30X13、12X18H9T、12X17Г9AH4 等合金不锈钢	5～20	20～95	350～400
37X12H8Г8MФБ（эИ481）、15X18H12C4TЮ（ЭИ654）等热强钢	1～12	15～90	300～350
XM70BMTЮ（ЭИ617）、XH78T（ЭИ435）、XH77TЮP（ЭИ437Б）、XH75BMЮ（ЭИ827）、XH62MBKЮ（ЭИ867）镍基强烈合金	1～12	20～40	80～120
AB、AK6、AK8、B75、B76 等铝合金	5～10	35～90	300～350
AMΓ6、AMΓ7 铝合金	5～10	25～40	100～150
BT3-1、BT5、BT5-1、BT6、BT8、BT9、BT15、OT4、BT22 钛合金	1～15	20～95	300～350

用高速锤模锻时，最好把凹模和冲头都做成整体，因为在模锻过程中金属的塑性很高，遇到任何小孔、间隙和分模面都会流入，这对锻件的脱模不利，并使模具迅速磨损。在模锻桨叶式叶轮、风扇和叶片类复杂的带肋锻件时，应在金属难于充满的最深模腔（肋、叶片及锻件其他较薄的部分）处钻直径为 1～2 mm 的几个小孔，以便将润滑剂燃烧所生成的气体和空气排出。

空气和气体也可以通过顶杆的间隙排出。在凹模（镶块）内表面的上部应做入模带，如同普通模锻设备上闭式模锻或挤压模锻时用的一样，当冲头进入凹模带可以起到导向的作用。冲头的台阶上不允许陡然过渡。冲头的支承面应做得尽量大一些，转接半径不得小于 5 mm。如果半径较小，建议采用带镶块的组合冲头。变形开始前，冲头进入凹模挤压筒内的深度应为 5～7 mm。圆柱形冲头挤其高径比 $H/D\leqslant$ 3～4 的比值来确定。凹模镶块是以 0.25 mm（直径为 60～80 mm时）到 0.4～0.45 mm（直径为 100～120 mm 时）的过盈热配合压入模套中。如果单位变形力较大时（大于 1 200 N/mm^2），过盈量还需加大 25%～30%。模具工作表面的粗糙度应为 $R_a=0.32\sim0.080$ μm。

取高冲击韧度和热稳定性的高强度钢作为模具材料，希望这些材料具有高的疲劳极限、抗磨性和低的线膨胀系数。高速模锻模具零件所常用的前苏联和其他国家的材料见表 2.3-34。

19.4　一些典型锻件的高速闭式模锻工艺

1）桨叶式叶轮（图 2.3-126d，表 2.3-32）。它是带肋锻件的代表之一，其工艺过程如下。

① 下料　材料为 AB 材料，坯料尺寸为 ϕ62 mm×30 mm，重量为 0.25 kg。



表 2.3-34　制造模具零件用的材料

零件名称	前苏联牌号		其他国家材料	
	材料牌号	硬度 HRC	材料牌号	硬度 HRC
冲头	5XHB	46 ~ 48	$6F_2$	37 ~ 40
	4X4M2BΦC（ДИ22） 4X5B2ΦC（ЭН958）	48 ~ 52	H13 + 1.5Ni S1	56
凹模	4X4M2BΦC（ДИ22） 45X3B3MΦC（ДИ23）	48 ~ 52	H13 H13 + 1.5Ni	56
	4X5B2ΦC（ЭН958）	46 ~ 50	H11	48
冲头镶块	4X4M2BΦC（ДИ22） 4X5B2ΦC（ЭН958）	46 ~ 52	H13、S1、S5	46 ~ 48
冲头模座	40X、5XHM	42 ~ 46	6F2、4340	37 ~ 40
垫板	5XHM、40X	40 ~ 46	6F2、H11	37 ~ 40
主冲头	4X3BMΦ	46 ~ 50	H11、H13	48 ~ 52
凹模模座	5XHB、5XHM	42 ~ 48	4340、H11	48 ~ 52
顶杆	X12Φ1、P18、3X2B8Φ 4X5B2ΦC	52 ~ 55	—	—
模套	30XΓCA、40X	38 ~ 42	—	—

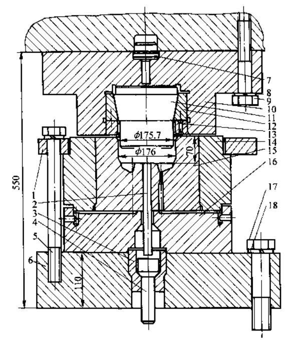


图 2.3-128　闭式模锻带肋锻件用的模具

1—紧固圈；2—顶杆；3—导筒；4—推杆；
5、9、17—紧固螺栓；6—底板；7—定位器；8、18—垫圈；
10—冲头模座；11—冲头；12—锥形圈；13—螺纹紧固圈；
14—凹模模套；15—凹模；16—垫板

② 加热　坯料在电炉中加热到 300℃，在此温度下保温 30 ~ 40 min，加热前先在炉底上面垫一块 12X18H9T 不锈钢板，以免在加热过程中镁石耐火砖的碎屑黏在坯料上，模锻时被压入锻件内。装炉前坯料都要酸洗，去掉表面上的油脂或其他脏物。

③ 模锻　采用图 2.3-128 所示模具在 M7326Б 型高速锤上闭式模锻，加热好的原始毛坯置于凹模中，一次打击成形。所需氮气压力为 1 500 kPa，相当于打击能量 28 000 J，模具对击速度为 7.5 m/s。锻件的基本工艺参数列入表 2.3-32 中。

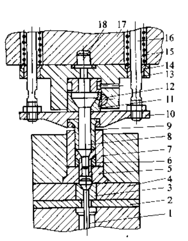


图 2.3-129　闭式模锻空心法兰盘锻件用的模具

1—顶杆；2—过渡垫板；3、5、13—导筒；4—垫板；
6—凹模；7—挤料筒；8—冲孔针；9—冲头；10—横梁；
11—压圈；12—楔铁；14—壳体；15—弹簧；16—螺栓；
17—锤杆；18—定位器

④ 锻后热处理，锻件经模锻后需要进行酸洗，除去小的飞边和其他缺陷，最后进行 100% 的检验。

下面以盖、套筒和法兰（图 2.3-126a、b、e）锻件为例，研究模锻盲孔或通腔锻件的典型工艺。

盖（AB 材料）、套筒（12X18H9T 材料）和法兰（12X21H5T 材料）锻件，在 M7352Б 型高速锤上分别用图 2.3-130 的闭式锻模（模锻盖和套筒）和图 2.3-129 的闭式锻模（模锻法兰）一工步锻成。盖和套筒锻件分别用 φ40 mm × 42 mm 及 φ48 mm × 44 mm 的坯料制造，而法兰用外径 φ87 mm、内径 φ44 mm、高 58 mm 的空心坯料制造。盖的坯料在电炉中加热到 300℃，套筒和法兰的坯料在高温炉内加热到 1 160℃。盖锻件是用打击能量为 12 000 J，氮气压力为

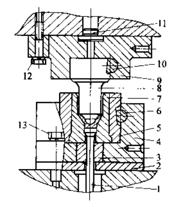


图 2.3-130　闭式模锻盖、圆盘和粗头的杆型锻件用的模具

1—顶杆；2—过渡板；3—导筒；4—下模壳体；
5—凹模模套；6、10—楔铁；7—凹模；8—冲头；
9—上模壳体；11—夹头；12、13—紧固螺栓

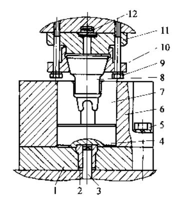


图 2.3-131　可分凹模闭式模锻管接头、叶片、扩散器、转接头锻件用的模具

1、11—过渡垫板；2—导筒；3—顶杆；4—垫块；
5、9—紧固螺栓；6—凹模模套；7—可分凹模的镶块；
8—冲头；10—压紧圈；12—夹头

700 kPa 和对击速度为 5 m/s 锻成的；套筒锻件是用打击能量为88 000 J，氮气压力为 5 000 kPa 和对击速度为 14.5 m/s 锻成的；法兰是用打击能量为 85 000 J，氮气压力为4 700 kPa 和对击速度为 14 m/s 锻成的。盖、套筒和法兰的模锻工艺参数见表 2.3-32。

2）环形锻件（图 2.3-126c）其工艺过程如下。

① 下料　材料为 12X17Г9AH4，外径 × 内径 × 高为 160 mm × 120 mm × 20 mm 的空心坯料。

② 加热　坯料加热温度为 1 160℃。

③ 成形过程　第一步在锤头重量为 1 000 kg 的锻锤上通过胎模镦粗和冲孔；第二步在 MP-1 半自动扩孔机上进行扩孔；第三步，在 M7326Б 型高速锤上采用图 2.3-129 所示的模具中闭式模锻成形。所用打击能量为 88 000 J，氮气压力为 5 000 kPa 和对击速度为 14.5 m/s。锻后通过顶杆将锻件从凹模中顶出。所模锻的锻件无模锻斜度并有相当薄的腹板和法兰盘（5 mm）。

3）管接头、转接头和扩散器类锻件（图 2.3-132）。以 BT8 钛合金叶片为例说明其工艺过程。

① 下料　用车削 $\phi 46$ 的坯料或 $\phi 50$ 的轧材先锻后铣成矩形截面的原始毛坯，其尺寸为 46 mm × 22 mm × 35 mm，重量为 0.27 kg，侧面四条棱边倒角 $C1$ 和一端倒角 $C4$。

② 加热　加热前将坯料涂上 ЭВТ-24 玻璃珐琅，然后在电炉中用 40 min 加热到 950℃。

③ 挤压模锻　在 M7326Э 型高速锤上采用图 2.3-131 所示可分凹模内挤锻成预成形锻件。挤锻时的打击能量为 6 500 N·m，氮气压力 360 N/cm² 和打击速度为 12.8 m/s。

④ 终锻　在 16 000 kN 水压机上采用开式模锻终锻成形。

4）高速锤上可分凹模模锻　有关文献介绍，某厂采用 55 kN·m 端面密封式高速锤，十多年来，用于批量生产圆弧齿轮壳体、空心法兰、多通壳体和叶轮等十多种复杂锻件。实践表明，使用多种形式的可分凹模模具，可以使高速锤模锻工艺特点得以充分发挥。根据锻件形状特点设计并采用了三种可分式模具，其中叶轮挤压模是一种专用胎模。下面介绍较为通用的两种。

① 垂直可分式模具　用于模锻圆弧齿轮壳体，其结构如图 2.3-133 所示。两半凹模 18 由销子 17 闭合构成凹模型腔，销子定位可保证变形过程中不发生错移。一个整体的圆弧齿圈 16 镶嵌在两半凹模之中，构成下模模腔的齿形部分。下模组件（16、17、18）放入凹模 10 内，其底缘被钩子 4 挂住，弹簧 6 保证钩子的有效性。外套 9 保护模套 10，以增加对击时的安全性。锻击结束后，冲头上升。如果锻件抱住冲头，钩子 4 便钩住半凹模底缘使锻件脱模。冲头升起后，顶杆 1 上升，通过斜面机构压缩弹簧 6，带动钩子外移使两半凹模松开。顶杆继续上升，将两半凹模完全顶出套外，再分开两半凹模取出锻件。

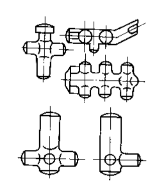


图 2.3-132　三通接头、扩散器和转接头

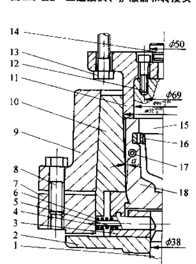


图 2.3-133　垂直可分式模具简图

1—顶杆；2—垫板；3—内垫板；4—钩子；5—堵盖；6—弹簧；
7—底座；8、12、13—螺钉；9—外套；10—下模套；
11—上模套；14、17—定位销；15—冲头；16—齿轮圈；18—下模块



这种结构，更换凹模镶块和冲头等工作零件，还可模锻空心法兰轴、多通壳体等复杂锻件。

②水平可分式模具　结构如图 2.3-134 所示。下模 5 做成整体的，两个销子 4 把压盖 2、圆弧齿圈 3 和下模组合在一起，构成下模模腔。锻击结束后，冲头上升，压盖 2 保证了锻件脱模。销子 4 退出后，顶杆 9 将锻件、压盖和齿圈一起顶出，取出锻件。

这种模具结构简单，连接可靠，模具寿命高，但劳动强度较大。由于锻件出模时的某些限制，这种结构不适宜于模锻有凸凹及枝叉的锻件。

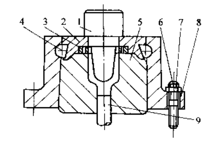


图 2.3-134　水平可分式模具简图
1—冲头；2—压盖；3—齿轮圈；4—销子；5—下模；
6—螺栓；7—螺母；8—压套；9—顶杆

编写：陆东元（长春一汽锻造有限公司）
李　梅（长春一汽锻造有限公司）
夏巨谌（华中科技大学）

第 4 章　螺旋压力机上模锻

1　螺旋压力机模锻特点及应用范围

1.1　螺旋压力机模锻的特点

螺旋压力机结构比较简单，使用维修比较方便，工艺适应性较强，在我国和欧洲锻造行业广泛使用。

螺旋压力机的特点包括优点和缺点。其优点如下。

1）锻件精度较高。因螺旋压力机的行程不固定，锻件精度不受自身弹性变形的影响；同时，螺旋压力机上一般装有下顶出器，又可采用特殊结构的组合模，可减小或消除锻件上的模锻斜度和余块，尤其配上少无氧化加热设备，可得到精化毛坯甚至成品零件。

2）可以采用整体式和组合式两种模具。特别是组合式模具，可根据设备吨位和锻件种类设计和制造出系列化通用模架。不同大小的锻件，只需更换凸、凹模镶块，可简化设计和制造过程，缩短周期，节省模具钢，降低成本。

3）设备结构比较简单，使用和维修比较方便。

其缺点如下。

1）螺旋压力机的螺杆和滑块间是非刚性联接，滑块承受偏心载荷的能力差，不适宜于多模膛模锻。但近年来所研制的新型液压螺旋压力机，采用加长滑块或带附导轨的象鼻滑块，提高了导向精度，也增强了承受偏载的能力。尤其是离合器式螺旋压力机，其滑块上部为一直径较大、长度较长的圆筒形导向部分，显著地提高了承受偏载的能力。

2）螺旋压力机每分钟行程次数少、打击速度低，所以生产率不高，且不宜用于拔长类制坯工序。但近年来新研制的螺旋压力机，尤其是离合器式螺旋压力机，在这方面有较大的改进。

1.2　应用范围

因螺旋压力机具有锤和压力机的双重工作特性，因而能满足各种主要锻压工序的力能要求。能在螺旋压力机上实现的锻压工序有：普通模锻、精密模锻、镦粗、挤压、精整、压印、弯曲、切边、冲孔和校正等。

当在螺旋压力机上进行开式模锻时，几乎可以模锻饼盘类和长轴类的大多数锻件。只是模锻长轴类锻件时，需采用空气锤型砧制坯或辊锻机专用设备制坯，如拔长、滚挤等，然后在螺旋压力机上预锻和终锻或直接终锻成形。

当在螺旋压力机上进行闭式模锻时，可采用整体凹模实现各种齿轮坯、饼盘、杯盘类零件的闭式模锻；也可以采用可分凹模实现阀体、杯杆类零件、法兰类零件的闭式模锻。

桥梁建筑、高压输电线的塔架用的高强度螺栓、铆钉、轴销等零件，可在螺旋压力机上采用开式或闭式镦锻成形。

目前，螺旋压力还被公认为是实现齿轮、叶片等零件精密模锻的最佳设备。同时，它又在粉末冶金、耐火材料、陶瓷和砖瓦等建筑材料行业中得到广泛应用。

2　锻件分类和锻件图设计

（1）锻件分类

螺旋压力机通用性强，所生产的模锻件品种多于其他任何模锻设备。为便于工艺及模具设计工作，根据所生产的锻件外形特点、成形特点和所用模具型式的不同，将其分为四类，见表 2.4-1。

（2）锻件图的制定

这里仅将其区别于模锻锤上锻件图制定的特点说明如下。

1）确定分模面的位置　由于螺旋压力机带有顶杆装置，可顶出锻件或凹模，对于第Ⅰ类和第Ⅱ类锻件，可用组合凹模，所以，根据锻件形状的不同，分模面的数目有一个或多个。同时，第Ⅰ类和第Ⅲ类锻件多采用无飞边或小飞边模锻，上下模的分模位置基本固定，一般设在金属最后充满的地方。对于第Ⅱ类锻件，其分模面的选定原则和锤上基本相同，不再赘述。但是，由于螺旋压力机上开式模锻多为无钳口模锻，当不采用顶杆装置时，更应特别注意减少模膛深度方向的尺寸，以利于锻件出模。

2）确定机械加工余量和公差　螺旋压力机上模锻件的余量和公差可查相关手册或资料。在一些老的参考资料中，把螺旋压力机上模锻件的余量和公差定得比吨位相当的模锻锤上锻件的余量和公差要大一些。其原因有二：一是由于摩擦压力机上模锻多为无钳口单模膛模锻，坯料放入模膛前其表面氧化皮未除净，模锻过程中也不易从模膛中吹去氧化皮，所以锻件表面粗糙度比锤上模锻高；二是复杂锻件要两火以上才能锻成，所以氧化皮厚，脱碳层深。其实，现在一般工厂都可通过改善加热方法来减少坯料的氧化；将螺旋压力机和螺旋压力机或其他模锻设备组成模锻生产线，以减少复杂锻件的加热火次。保证锻件达到部标要求。

表 2.4-1　锻件分类

锻件类别		锻件简图	说明
第Ⅰ类	顶镦类锻件		1）头部局部镦粗成形，杆部不变形 2）多用开式模具进行小飞边模锻
	杯盘类锻件		1）整体镦粗、挤压成形 2）多采用闭式模具，进行无飞边模锻



续表 2.4-1

锻件类别		锻件简图	说明
第Ⅱ类	长轴枝叉类锻件		1）相当于锤上模锻的长轴类锻件，又可分为直线主轴、弯轴、叉杆及带枝芽、十字轴类锻件 2）采用开式模具，进行有飞边模锻
	长轴弯曲类锻件		
第Ⅲ类	用组合凹模锻出的在两个方向有凹坑的锻件		采用组合凹模，可得到在两个方向上有凹坑、凹挡的锻件，如法兰、三通阀体等
第Ⅳ类	精密锻件		是少无切削工艺在螺旋压力机上的应用

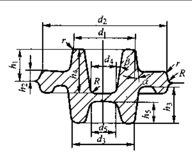
对于局部镦粗件，因杆部不变形，可参考平锻机模锻余量公差表。

3）确定斜度和圆角半径　螺旋压力机模锻斜度的大小，主要取决于有无顶杆装置，同时也受锻件尺寸之比（h/d、h/b……）和材料种类的影响，见表 2.4-2。对于钢和合金钢锻件也可按相关手册或资料选择。

圆角半径（r、R）主要取决锻件材料和锻件尺寸，见表 2.4-3。对于钢和合金钢锻件也可按相关手册或资料选择。

4）冲孔连皮及压凹　带有通孔的锻件，冲孔连皮可参照锤上模锻选用。不通孔的锻件，孔的尺寸可按表 2.4-4 确定。

表 2.4-2　锻件模锻斜度



续表 2.4-2

斜度种类 / 材质 / 有无顶杆 / 高度与直径（宽度）之比材质	外模锻斜度 α				内模锻斜度 β			
	有色金属		钢		有色金属		钢	
	有	无	有	无	有	无	有	无
<1	0°30′	1°30′	1°	3°	1°	1°30′	1°30′	5°
1~2	1°	3°	1°30′	5°	1°30′	3°	3°	7°
2~4	1°30′	5°	3°	7°	2°	5°	5°	10°
>4	3°	7°	5°	10°	3°	7°	7°	12°

注：高度与直径（宽度）之比，即图中 h_1/d_1、h_2/d_2、h_3/d_3、h_4/d_4、h_5/d_5 等。

表 2.4-3　锻件圆角半径

mm

圆角种类 / 材质 / 高度方向尺寸 h	凹模圆角 R		凸模圆角 r	
	有色金属	钢	有色金属	钢
<5	0.8~1.0	1.0	0.5	0.8
5~10	1.0	1.0~1.5	1.0	1.0~1.2
10~15	1.5	2.0	1.2	1.5
15~20	1.8~2.0	2.5	1.5	2.0
20~30	2.2	2.5~3.0	1.8	2.0~2.5
30~40	2.5	3.0~5.0	2.0	2.5~3.5
>40	>3.0	>5.0	>2.0	>3.5

表 2.4-4　孔的尺寸

mm

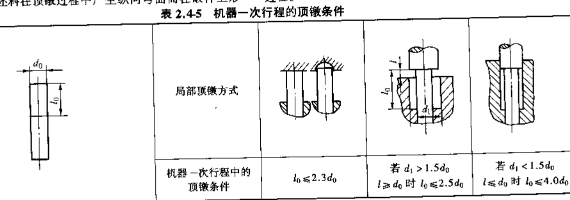
D 钢	D 有色金属	H	R
<20	<10	1/2D	1/2D
20~50	10~40	2/3D	1/2D
>50	>40	<D	<1/5D

3　模锻工步的选择

(1) 第 1 类锻件

该类锻件有顶镦件和杯盘齿轮件两种，顶镦件的成形工序是顶镦。该类件杆部较长，但不参与塑性变形。工艺上的主要问题是，限制坯料变形部分的长度和直径的比值（见表 2.4-5），以免坯料在顶镦过程中产生纵向弯曲而在锻件上形成折叠缺陷。因为螺旋压力机上模锻具有适合于单模膛模锻和中小批量生产的特点，通常只用于可一次镦粗成形的小锻件，若头部过大，不符合一次镦粗成形条件（见表 2.4-5），则应选用两次以上的顶镦。对于中小批生产来说，为了减少模具套数，简化模具结构，可选用较粗的坯料和其他制坯设备组成机组，采用先镦粗后拔杆，或先拔杆后镦粗的工艺过程。

表 2.4-5　机器一次行程的顶镦条件



	局部顶镦方式			
	机器一次行程中的顶镦条件	$l_0 \leqslant 2.3d_0$	若 $d_1 > 1.5d_0$ $l \geqslant d_0$ 时 $l_0 \leqslant 2.5d_0$	若 $d_1 < 1.5d_0$ $l \leqslant d_0$ 时 $l_0 \leqslant 4.0d_0$

杯盘齿轮类锻件多采用无飞边模锻。对于形状比较简单的实心锻件；具有小孔，厚壁的环形锻件，可采用毛坯直接在终锻模膛中模锻成形的工艺（见图 2.4-1a）。对于形状较复杂，特别是带孔、小凸台的锻件，为便于成形并防止产生夹层缺陷，必须采用预镦工步（图 2.4-1b），预镦坯料直径 $D_y = D_d -$ （3~5）mm。对于锻件形状特别复杂的锻件，还

要采用定型预锻工步，如图 2.4-1c。

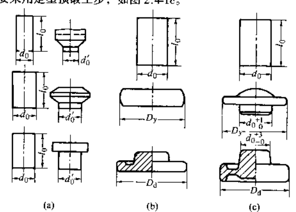


图 2.4-1　杯盘齿轮类锻件模锻工艺过程

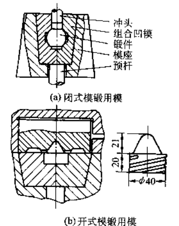
应该指出，由于螺旋压力机打击速度较模锻锤低，毛坯易冷却，故其成形能力较差。为此，在选择充满模膛的方式上，应尽可能以镦粗充填为主。在选择坯料直径时，应尽可能按锻件凸起部分作为坯料直径。

（2）第Ⅱ类锻件的模锻工艺特点

该类锻件是自由形状锻件，工艺设计的主要依据是计算毛坯直径图。工艺计算方法可参阅锤上模锻的相应内容。由于螺旋压力机单模膛模锻的特点，应力求选用原毛坯直接终锻成形。若锻件形状较复杂，必须预先制坯时，也可在螺旋压力机上进行多模膛模锻。但是，由于每分钟打击次数少，打击速度较慢，所以，模膛数目不宜超过两个，且在制坯模膛里的打击次数也应有所限制（不超过 2～3 次）。否则，终锻时金属温度偏低，影响成形能力和终锻模膛寿命。如果操作熟练，在制坯模膛中制坯时实现半行程打击（可采用能量预选装置控制），则可缩短打击时间，弥补其打击次数少，打击速度较低的不足。根据上述特点，螺旋压力机可进行弯曲、成形、卡压、压扁等单次打击的制坯工步，也可进行打击次数为 2～3 次的简单滚压制坯。若锻件截面面积相差较大，必须采用拔长—滚压，或需要打击次数较多的滚压制坯工步时，可根据生产批量的不同，建议采用自由锻制坯、胎模锻制坯、自由锻锤固定型钻制坯、专用设备上制坯（包括辊锻机上制坯、三辊仿形斜轧机上制坯、电镦机上制坯等）等方案，这时，摩擦压力机上仅进行终锻成形。

（3）第Ⅲ类锻件的模锻工艺特点

该类锻件往往有两个凸缘（法兰），或有两个方向的凸起、凹档。为了保证锻件能从模膛中取出，凹模必须是组合的。该类锻件的锻造工艺差别很大，例如，双凸缘（法兰）锻件，实际上是两次局部镦粗成形；螺纹堵头锻件和一些两向有凸台的锻件，则相当于可分凹模模锻，见图 2.4-2。



(a) 闭式模锻用模

(b) 开式模锻用模

图 2.4-2　第Ⅲ类锻件模锻工艺举例

4　开式锻模设计

螺旋压力机上的开式锻模的设计步骤是先根据热锻件图进行模膛设计，然后再进行结构方面的设计。螺旋压力机上开式锻模的模膛设计除飞边槽尺寸及型式的选用与锤上锻模有些差别外，其余基本相同，故可参考本篇第 3 章进行设计，这里侧重介绍锻模的结构设计。

4.1　飞边槽

用于钢锻件和有色金属锻件的飞边槽尺寸分别见表 2.4-6 和表 2.4-7。

表中飞边槽型式Ⅰ，适用于各种形状的锻件，应用最广；型式Ⅱ主要适用于小飞边模锻和有预锻及预切边工步的终锻模膛；型式Ⅲ适用于复杂形状的锻件或锻件的复杂部分。

表 2.4-6　钢锻件飞边槽尺寸　　mm

	设备吨位/kN	h	h_1	b	b_1	r	R
Ⅰ	≤1 600	1.5	4	8	16	1.5	4
Ⅱ	1 600～4 000	2.0～2.5	4	10	18	2.0	4
	4 000～6 300	2.5～3.0	5	10	20	2.5	
Ⅲ	6 300～10 000	3.0～3.5	6	12	25	3.0	6
	＞10 000	4.0	7	14	30	3.5	7



表 2.4-7　有色金属飞边槽尺寸　mm

设备吨位/kN	h	h_1	b	b_1	r	R
≤1 600	1.2	4	6	25	1.5	4
1 600～4 000	1.5	4	8	30	2.0	4
4 000～6 300	2.0	5	8	35	2.0	5
6 300～10 000	2.5	6	10	35	2.5	6
>10 000	3.0	7	12	40	3.0	7

4.2　模膛布置

模膛在模块上的布置应尽量避免和减少偏心打击，同时要使操作方便，即使整个操作路线最短。具体设计时必须遵循以下原则。

1) 当只有终锻模膛时，模膛中心要与模块中心和螺杆中心重合。

2) 当同时有预锻槽膛和终锻模膛时，两个模膛分置螺杆中心线两侧。两个模膛中心线至螺杆中心线的距离之和及两距离之比分别为：

$$a+b\leqslant\frac{D}{2}$$

$$a/b=1/2$$

其中 D 为螺杆螺纹的中径，见图 2.4-3。

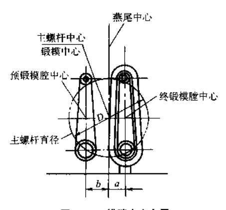


图 2.4-3　模膛中心布置

3) 因螺旋压力机行程速度慢，模具受力条件较好，所以锻模模块的承击面一般可取为锤用锻模的 1/3。

4) 螺旋压力机一般都备有下顶出器，而无上顶料装置，所以，宜将锻件形状比较复杂的模膛置于下模。

5) 当同时有模锻模膛和制坯模膛时，必须考虑加热设备的位置，应保证操作方便。

6) 对于模膛比较深，形状比较复杂的部位应开排气孔，这样有利于金属充满模膛。

4.3　模壁厚度的确定

模壁厚度可根据模膛深度 h、圆角半径 R 和模壁斜度 α 来确定。

槽膛最小外壁厚度（图 2.4-4a）的确定：

$$t_0=K_0h$$

式中，K_0 为系数，按表 2.4-8 选取。

模膛间最小壁厚（图 2.4-4b）的确定：

$$t_1=K_1h$$

式中，K_1 为系数，按表 2.4-9 选取。

表 2.4-8 和表 2.4-9 的适用范围为 $\alpha\geqslant7°$、$R\geqslant3$ mm。当 $\alpha<7°$、$R<3$ mm 时，K 值适当增大。

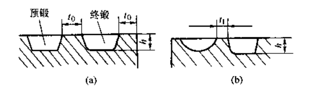


图 2.4-4　模壁厚度

表 2.4-8　系数 K_0

模膛深度 h/mm	<20	20～30	30～40	40～55	55～70	70～90	90～120	>120
K_0	2	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.8

表 2.4-9　系数 K_1

模膛深度 h/mm	<30	30～40	40～70	70～100	100～150
K_1	1.5	1.3	1.1	1.0	0.8

5　闭式锻模设计

闭式槽锻是实现无飞边模锻的主要方法之一，比较适合于模锻圆形锻件。图 2.4-5 为螺旋压力机上使用的一种较为典型的闭式模锻锻模结构。设计闭式锻模时，应着重注意凸、凹模间的间隙和凸模（冲头）的强度。

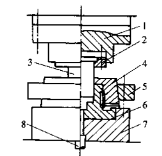


图 2.4-5　典型的闭式锻模结构

1—上底板；2—冲头固定器；3—冲头；4—凹模外圈；5—压圈；6—凹模芯；7—凹模座；8—顶杆

5.1　凸、凹模间隙的确定

该类锻模在冲头和凹模、顶杆和凹模间要能自由地滑动，为此要有适当的间隙。间隙过大，在金属流动时，此处将生成纵向毛刺，加速模具的磨损和造成顶杆顶件困难；间隙过小，因温度的影响和模具的变形，将使冲头和凹模、顶杆和凹模间运动困难。通常顶杆和凹槽间按 H8/f8 配合形式选用。冲头和凹模间的间隙如表 2.4-10。

5.2　凸模尺寸的确定

现代螺旋压力机虽然配有能量控制装置，但在金属产生塑性变形的过程中，设备每次打击所释放出来的能量仍难于

准确控制，而影响锻件变形力和变形量的因素又很多，所以，设备每次行程实际提供的能量不可能恰好等于金属塑性变形的需要值。若设备每次打击提供的能量小于锻件塑性变形所需的能量时，则出现欠压现象，必须再锻击一次；若设备每次行程提供的能量大于锻件塑性变形所需的能量时，则锻模可以闭合，即打靠，锻件高度方向尺寸合格，但尚有一部分多余的能量由模具和设备的弹性变形所吸收。后一种情况是正常的，设备打击的多余能量不能过大，否则，它将引起动力消耗的增加，机器噪声的增大和模具、设备弹性变形量的增大。严重时，还将引起模具或设备部分零件产生过大的变形而损坏。对闭式模锻来说，冲头强度是薄弱环节。为避免冲头产生塑性变形而损坏模具的现象，除操作者应注意调节打击能量外，模具设计还应保证冲头具有必要的断面积，其参考值详见表 2.4-11。若锻模上已有足够的承击面，则允许冲头的断面积不受表中数值的限制。

表 2.4-10　冲头和凹模间的双边间隙值　mm

冲头直径	间隙值	冲头直径	间隙值
<20	0.10	40~60	0.15~0.20
20~40	0.10~0.15	>60	0.20~0.30

表 2.4-11　闭式模锻冲头允许的最小断面面积

项　目 \ 设备吨位 /kN		400	630	1 000	1 600	2 500	4 000	6 300
运动部分最大动能/J		1 250	2 500	5 000	10 000	20 000	40 000	80 000
滑块最大行程/mm		240	270	310	360	420	500	600
冲头允许最小断面面积/mm²	当 $\sigma_p=600$ MPa (18CrNiW)	670	1 050	1 700	2 700	4 100	6 700	10 500
	当 $\sigma_p=720$ MPa (5CrNiMo，5CrMnMo)	550	870	1 400	2 200	3 500	5 500	880 000

6　成组锻模的设计

（1）锻件的分类与分组

按照锻件的形状和相对尺寸进行分类，在同一类中将形状、尺寸及工步相似的锻件再划分成若干组，如在平面图上为圆形的锻件类中可分为齿轮形组、环圈形组和套筒形组等。然后以组为基础制订锻件图。根据这一思路，锻件的分类与分组方案列于表 2.4-12。

表 2.4-12　锻件分类表

类组 \ 种		1	2	3	4	5
第一类杆类	Ⅰ 分模线和主轴线都是直线的锻件					
	Ⅱ 分模线稍有曲折的锻件					
第二类饼类	Ⅰ 齿轮形锻件					
	Ⅱ 圈环形锻件					
	Ⅲ 套筒形锻件					

（2）成组锻模设计

成组锻模是为一组形状相似、尺寸相近的锻件设计的，以通用模体和可换或可调整元件组成的一种锻模。

其设计原则为：可更换或可调换元件应力求标准化、系列化、通用化；配合层次尽可能减少，并能在模锻设备上迅速装拆；结构紧凑，调整简单，操作方便；具有足够的刚性和精度，良好的耐磨性等。

1）模体设计　模体结构要适合所用锻压设备的安模空间。模体尺寸的确定应根据锻模中模膛的数量与尺寸进行布排。考虑最小壁厚等因素，得出模块的最小轮廓尺寸。在模体上应尽量设计有同类同组锻件能通用的制坯型槽。

2）镶块设计　对仅需单模膛或双模膛和占位置不大的

制坯模膛与终锻模膛适合采用镶块。宜作成组锻模的镶块有两种：①圆镶块，饼类锻件可采用圆形镶块锻模，也适用于表 2.4-12 的二类Ⅰ组锻件；②方镶块，杆类锻件可采用方镶块锻模，也适用于表 2.4-12 的一类Ⅰ组锻件。

图 2.4-6c 所示组合式锻模适合于作为螺旋压力机用成组锻模。它既能安装方形锻模也能安装圆形锻模，还可安装小型反挤压模。这样就可实现模座单一化，模具工作部分多样化，模具尺寸标准化。

7　锻模结构设计

(1) 锻模的结构型式

由于螺旋压力机的双重工作特性，其模具结构型式可同时采用锤锻模和热模锻压力机锻模两种结构型式，如图 2.4-6 所示。

1) 整体式锻模　图 2.4-6 中 a、b 为整体结构式锻模。其优点是结构简单，制造、使用和维修方便。当车间既有模锻锤又有螺旋压力机时，要求同样能量设备的模具可以通用时，可采用锤锻模结构型式的整体模（图 2.4-6a），以便根据生产任务调节不同设备的负载；大吨位摩擦压力机多用这两种整体式锻模。

2) 组合式锻模　图 2.4-6c 和图 2.4-5 为组合式锻模。组合式（包括镶块式）锻模节省模具钢，便于模具零件标准化，缩短生产周期，降低模具成本。组合式锻模适合于多品种中小批量小型锻件的生产。

(2) 组合式锻模结构设计

整体式结构见锤用锻模设计。这里介绍组合式锻模的结构设计。

组合式锻模通常由上、下底板（模板），上、下模块，导柱、导套或导销及定位紧固件等零件组成。常用的组合式锻模及适用范围列于表 2.4-13。

表 2.4-13　常用的组合式锻模

编号	简图	说明	编号	简图	说明
1		上、下模块为圆形，通过圆形锁扣导向。适合于模锻圆形锻件或不太长的小型锻件	6		这是第二种镶块式组合模，模块为圆形，模块同模套过盈压配，依靠模套上的形锁扣导向。适合于小型件的压印或冷锻
2		上、下模块均为圆形，下模为镶块结构，螺母除对凹模镶块起固定作用外还兼作上模的导向。适合于作镦锻模	7		这是第三种镶块式组合模，矩形镶块通过螺钉固紧在模座内，依靠模座上的平行导锁导向。适合于模锻小型长锻件
3		上、下模块均为矩形，均通过燕尾和楔固定在上、下底板上，以平行锁扣导向。适合于模锻长形锻件	8		这是第四种镶块式组合模，矩形镶块通过斜楔固紧，上、下模通过四角导锁导向。适合于模锻小型杆类件
4		与 3 号模比较，其不同之处是采用导销导向适合于模锻细长形锻件	9		由上、下底板及导柱导套组成模架，采用矩形模块。适合于模锻中小型长形件
5		这是一种镶块式组合模，圆形镶块通过楔固紧在模座内，依靠模座上圆形锁扣导向。适合于模锻小的圆形锻件	10		同 9 号模相比，该模架既能安装矩形模块，又能安装圆形模块。适合于模锻各种中小型锻件

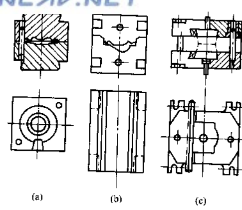


图 2.4-6 锻模结构型式

(3) 模具的导向与顶出装置

为了保证锻件的尺寸精度和模具安装调整方便，在模具上应设置导向装置。对于整体模具可采用导销（图 2.4-6a）或锁扣（图 2.4-6b）实现上下模导向。对于组合模，尤其带通用模架的组合模，通常采用导柱导套的导向结构，而且这种导向装置的导向精度更高。此外，对于回转形锻件的锻模还可采用凸凹模自身导向。

为了取出锻件，应备有顶出器。精锻时，顶杆长时间与热锻件接触，为避免因受热膨胀过大或被镦粗而卡死在凹模中，在使用时，常需从模具中取出油冷，故顶杆应能在不拆卸模具的情况下从模具中取出。通常顶杆与凹模的间隙取 0.1～0.15 mm。

8 螺旋压力机

8.1 螺旋压力机的种类及其性能特点

螺旋压力机是采用螺旋机构传递飞轮能量的锻压机器。其结构原理如图 2.4-7a 所示，基本部分由飞轮、螺杆、螺母、滑块和机身组成。通过摩擦、液压或电动机直接驱动等传动装置使飞轮加速转动以积蓄能量，同时，由螺旋副将飞轮的旋转运动转化为滑块的上、下直线运动。

按传动方式，螺旋压力机可分为如下五种类型。

(1) 摩擦螺旋压力机

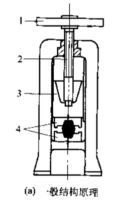
它是借助电动机驱动的摩擦盘，通过摩擦传动，使飞轮、螺杆和滑块产生运动和蓄存能量。前述的双盘摩擦压力机就是这类中应用最广的一种（2.4-7b）。它具有结构简单、制造成本低的特点，但效率和生产率较低。它是目前拥有量最多、应用最广的螺旋压力机。

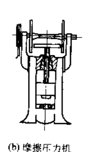
(2) 液压螺旋压力机

液压螺旋压力机种类甚多，图 2.4-8 是我国由德国引进的 HSPRZ630 型液压螺旋压力机。它是由液压系统驱动液压马达，通过齿轮传动带动飞轮旋转，使运动部分得到能量和产生上下运动。它可称为液压马达式液压螺旋压力机。由于液压传动效率高和液压元件标准化程度高，使液压驱动装置结构紧凑合理，故特别适用于大型螺旋压力机。目前，世界上最大的是 HSPRZ1180 型液压螺旋压力机，其公称压力为 140 MN，螺杆直径达 1.18 m。

由于我国液压马达性能较差，而液压缸和副螺旋副制造容易，华中理工大学结合我国国情，采用减摩工程塑料作副螺母，使这种传动方案获得了新的生命力。图 2.4-9 就是这种液压螺旋压力机副螺杆传动部件结构图。液压系统供给的高压油进入液压缸的上腔后，推动活塞并带动副螺杆下行，由于副螺母而定在液压缸支座上不能转动和移动，使得副螺杆作向下螺旋运动。副螺杆与主螺杆的导程相同，二者用尼龙十字沟槽联轴器联接，于是副螺杆带动飞轮及主螺杆作同步向下螺旋运动，使飞轮获得能量，滑块下行，经模具锻打锻件。当高压油进入液压缸下腔时，推动活塞带动副螺杆及主螺杆作向上螺旋运动，于是滑块提升回程。液压缸上、下腔停止供给高压油和下腔排油阀关闭时，滑块静止不动。液压缸上、下腔供油可以很方便地控制，因而滑块可停于任意位置。

在此传动部件中，首次采用特制的布质酚醛树脂层压材料制造副螺母，因该材料的布质纤维微孔能蓄存微量润滑油，因而有极好的自润滑性能，使副螺旋副传动效率提高到





(a) 一般结构原理　　(b) 摩擦压力机

图 2.4-7 螺旋压力机结构原理

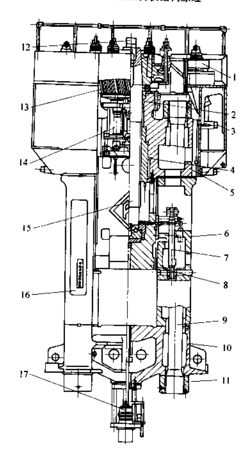


图 2.4-8 HSPR2630 型液压螺旋压力机

1—传动小齿轮及液压马达；2—滑动轴承；3—保护平台；4—铜螺母；5—上横梁；6—侧立柱；7—平衡重液压缸；8—滑块；9—拉杆；10—底座；11—拉杆螺母；12—飞轮打滑测量装置；13—飞轮；14—制动器；15—螺杆；16—行程调节装置；17—下顶出器

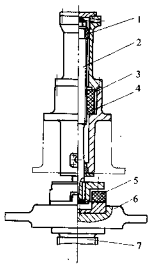


图 2.4-9　副螺杆传动部件
1—活塞；2—副螺杆；3—玻璃钢销；4—胶木副螺母；
5—尼龙联轴器；6—飞轮；7—主螺杆

95%以上。实验表明，这种材料有良好的耐磨性和足够的强度，使传动部件结构简单、制造容易、使用寿命长、维修方便、不受外购件供应的限制等优点。

副螺母和钢制液压缸支座的连接，因两种材料切削性能相差悬殊，要加工出能与圆销配合很好的深孔，有一定困难。因此采用玻璃钢销，并用直接在销孔内浇铸的方法制成。玻璃钢销的受力安全系数为 25 以上。实践证明，这种连接方式，孔的加工要求很低，浇铸玻璃钢销的工艺也很简便。经 6 300 kN 液压螺旋压力机千余次的重负荷试验后拆开检查，连接可靠。

液压螺旋压力机相对于摩擦螺旋压力机传动效率有较大提高，但滑块行程次数少、打击速度低的缺点仍很明显。

(3) 电动螺旋压力机

电动螺旋压力机的飞轮是由特殊电机直接驱动的。图 2.4-10 为我国进口德国 WEINGARTEN 公司的 PSM 型电动螺旋压力机。电动机的环形定子通过支架固定在机身的顶部，电机的转子即飞轮本身。当定子绕组通以三相交流电时，电磁力驱动飞轮（转子）旋转，如果改变在定子上的电源相序，就能改变飞轮的旋转方向。通过螺旋副的作用，就能实现滑块的往复运动和实行锻击工序。

电动螺旋压力机除具有一般螺旋压力机的特点外，还有如下特点。

1) 传动方式简单，除 PZS 系列以外，直接传动电动螺旋压力机定子和转子（带飞轮）之间不直接接触，无机械磨损，因此，检修工作量（包括备件的更换量）很小，节约劳动力和维修费用。

2) 便于电控，力能参数调节方便可靠，动作平稳，传动噪声很小。

3) 传动链短，部件少，结构简单，设备体积小，外形美观，一般无传动部件暴露于机毂外。

由于变频电源控制系统的成功解决了对电网的冲击问题，因此，近年来发展很快。

(4) 气液螺旋压力机

气液螺旋压力机的工作原理如图 2.4-11 所示，传动装置由气室 1、活塞 2、液压缸 3、副螺杆 4 和副螺母 5 组成。液压缸上腔 I 与气室相通，下腔连液压系统 6，由带飞轮的油泵直接驱动。当液压缸下腔II处于排油状态时，在气室中的高压气体作用在活塞上的作用力推动下，副螺杆输出转矩，带

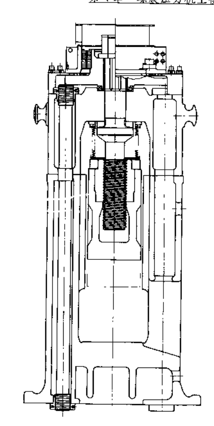


图 2.4-10　PSM 型电动螺旋压力机

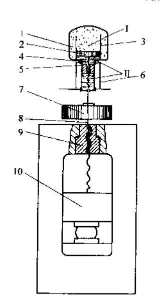


图 2.4-11　气液螺旋压力机工作原理图
1—气室；2—活塞；3—液压缸；4—副螺杆；
5—副螺母；6—液压系统（未完全表示）；
7—飞轮；8—主螺杆；9—主螺母；10—滑块

动飞轮 7 和主螺杆 8 作向下螺旋运动，实现滑块的向下空行程和锻击工件；当液压缸下腔进高压油时，活塞压缩气体，使滑块回程。这种设备具有高效、节能、快速、易于自动化的优点，是我国锻压机械第一项实用新型专利。

(5) 离合器式螺旋压力机

这是 20 世纪 80 年代在德国发展甚快的新型螺旋压力机，我国大连锻造厂已引进公称压力 16 000 kN 的 NPS 型高能螺旋压力机，其工作原理如图 2.4-12 所示：主电动机通



过带传动驱动飞轮 1 作单向旋转，飞轮内带有液压操纵的摩擦离合器，带摩擦块的从动盘 3 与主螺杆 4 相连。当高压油通过环形活塞 2 推动主动盘与从动盘 3，带动螺杆旋转，使装有螺母的滑块 5 加速下降并进行锻击，当滑块的速度因锻击而下降到一定的程度时，特殊的传感装置发出动作信号，使操纵液压缸卸压，导致离合器的主从动盘脱开，与液压系统相连的回程缸 6 驱动滑块回程而完成了一个工作循环。

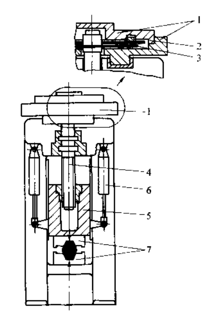


图 2.4-12 离合器式螺旋压力机结构原理图
1—飞轮；2—环形活塞；3—从动盘；4—主螺杆；
5—滑块；6—回程缸；7—机具

这种压力机上的离合器结构如图 2.4-13 所示。

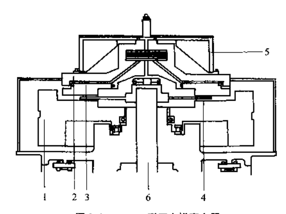


图 2.4-13 NPS 型压力机离合器
1—飞轮；2—离合器液压缸；3—离合器活塞；
4—从动盘；5—消音罩；6—主螺杆

启动时，离合器液压缸 2 内通入油压为 9.5 MPa 的高压油推动从动盘 4 使之与飞轮结合，由于从动盘和螺杆为花键连接，使飞轮与螺杆结合成一体而加速旋转。由于加速部件（离合器从动盘、螺杆、螺母和滑块）质量很小，所以加速时间极短，整个工作行程实际上可认为是以稳定的速度进行的。连变形阶段也基本上保持这一滑块速度，只不过相对飞轮的转速稍降（最大降速 12.5%）而已。滑块向下行程结束后，离合器自动脱开，飞轮继续沿原方向旋转，恢复速度，滑块利用固定在机身上的回程缸而向上回程。储存在机身内的回弹能量使滑块回程获得较高的回程速度。滑块向下和向上的稳定速度为 500 mm/s，回程缸的提升力相当于滑块、垫板和上模重力的 6 倍，离合器活塞压板和从动盘间的间隙为 1.5 ~ 2 mm。在摩擦衬垫产生磨损的情况下，更换衬垫之前可以进行四次间隙调节，更换前的最大磨损量约为 8 mm。在调整模具的慢动作时，也是用回程缸进行的。

根据国内外对螺旋压力机的研制及使用情况表明，螺旋压力机既是一种较老的模锻设备，如摩擦压力机，又不断有新的发展，如离合器式和电动式螺旋压力机。但总的基本情况是，吨位在 10 000 kN 以下仍以摩擦压力机为主，吨位在 10 000 kN 以上以液压螺旋压力机、离合器式螺旋压力机和电动螺旋压力机居多，而近年来由于电动螺旋压力机的许多独特优点而发展更快。

离合器式螺旋压力机能量虽大，但因是达到规定压力后飞轮和从动盘自动脱开，其长期工作允许的最大压力约为公称压力的 1.25 ~ 1.3 倍，不像其他螺旋压力机为 1.6 倍，因而只适用于大变形量、深挤压等类的锻件，对于一般杆件和叶片、齿轮等精密模锻件，就难以满足其大能量、小力和小变形、大力的力能参数的要求，显示出这种压力机的工艺局限性。

8.2 螺旋压力机的主要技术参数及吨位选择

（1）主要技术参数

1）公称压力 P_g　在这种压力下，螺旋压力机能给与锻件比较多的能量，它并不是螺旋压力机所允许的最大压力，只是一个参考值而已，但仍把它看作是反映螺旋压力机的一个主要技术参数。例如 J53-400 型摩擦压力机的公称压力为 4 MN，630 t 液压螺旋压力机的公称压力为 6.3 MN。

2）最大打击能量 A_L　最大打击能量是指滑块加速下行到板限位置（相当于最小封闭高度）时，螺旋压力机的运动部分所具有的最大动能。它由飞轮等转动零件的旋转动能和滑块的直线移动动能两部分所组成。根据计算后者仅为前者的 2% 左右，因此，螺旋压力机的打击能量主要是飞轮等转动件的旋转动能。

最大打击能量是反映螺旋压力机工作能力的另一个主要参数。根据使用螺旋压力机的经验，最大打击能量 A_L（J）和公称压力 P_g（10 kN）有如下关系：

$$A_L = (3.8 \sim 4.9)\ P_g^{3/2}$$

式中，系数 3.8 ~ 4.9，对于大吨位压力机取小值；小吨位压力机取大值。例如 J53-400 型摩擦压力机的最大打击能量为 36 kJ，630 t 付螺杆液压螺旋压力机的最大打击能量为 80 kJ。

3）滑块行程 H_m　螺旋压力机的滑块行程是指滑块从上板限位置到下板限位置所经过的距离。其值除确保飞轮达到额定的打击能量外，同时还考虑到便于装卸模具和取出锻件。对于工艺用途广泛的摩擦压力机，滑块行程（cm）可参考下列关系式确定：

$$H_m = 12\ \text{cm} + 1.9\sqrt{P_g}$$

例如，J53-400 型摩擦压力的滑块行程为 350 mm。

4）行程次数 n　螺旋压力机的行程次数 n 是指连续打击时滑块每分钟可能的往复次数（每次均达到最大行程）。行程次数在一定程度上体现了压力机的生产率。例如，J53-400 型摩擦压力机的行程次数为 14 次/min；630 t 液压螺旋压力机的行程次数为 10 次/min。

国外有的以螺旋压力机主螺杆直径的数值作为系列的主参数，而不是以公称压力作为主参数。公称压力 P_g（kN）与主参数（主螺杆直径 d）的关系为

$$P_g = 0.1d^3$$

飞轮总能量 A_L（kJ）与主螺杆直径 d 的关系为



$$A_L = 4.5d^3$$

滑块行程等于螺杆直径。最小模具高度为螺杆直径的两倍，最小封闭高度为螺杆直径的 3 倍。

（2）吨位选择

尽管螺旋压力机是靠能量进行工作的，但普遍仍按公称压力来表示设备吨位。其原因是人们对于压力机（包括螺旋压力机在内），希望以力这个参数作相互比较。如果把螺旋压力机的冷击力当作在锻造时它能达到的最大压力，则是不对的，因为此时它没有锻件变形能。国外常把冷击力的一半当作螺旋压力机的公称压力，这完全是一种人为的规定，由于结构等各方面的原因，它的冷击力不一定正好是公称压力的两倍。对于公称压力 P_g 应当这样来理解，即在公称压力下，螺旋压力机的力和能量都能达到较大而又合理的数值，此时锻件的变形能，一般为飞轮能量的 60% 左右，若无摩擦式保险装置，可达 70%。

对于给定的锻件，如何选择合适的螺旋压力机呢？

1）确定锻件变形所需要的力　锻件变形所需要的力可按经验公式确定：

$$P = KF$$

式中，P 为锻件变形所需要的力，kN；F 为锻件水平投影面积，cm²；K 为系数。若锻造温度为 1 200℃、要求锻件轮廓清晰时，取 $K = 80$ kN/cm²；当锻件具有圆角及光滑轮廓时，取 $K = 50$ kN/cm²；对于厚度很薄的锻件（如叶片等），取 $K = 110 \sim 150$ kN/cm²。

2）确定压力机的公称压力　压力机的公称压力可按如下经验公式确定：

$$P_g = \frac{P}{q}$$

式中，P_g 为公称压力，kN；q 为系数，对于变形行程小的精压件，取 $q = 1.6$；对于变形行程稍大的锻件，取 $q = 1.3$；对于变形行程大、需要变形能量也大的锻件，取 $q = 0.9 \sim 1.1$。

还可用如下公式计算：

$$P_g = a\left(2 + 0.1\frac{F_{锻}\sqrt{F_{锻}}}{V_{锻}}\right)\sigma_b F_{锻}$$

式中，$F_{锻}$ 为锻件水平投影面积，mm²；$V_{锻}$ 为锻件体积，mm³；σ_b 为终锻时材料抗拉强度，MPa；a 为系数，对于开式模锻，$a = 4$；对于闭式整体凹模中无飞边模锻，$a = 3$；对于闭式可分凹模中无飞边模锻，$a = 5$；对于挤压，$a = 5$。

除了采用上述公式计算和测量锻件所需要的变形能来确定螺旋压力机的吨位外，也可按所求得的变形能和借助于力能关系曲线来确定压力机的吨位。

9 实例

（1）齿轮坯开式锻模

图 2.4-14 为 P-60B 耙斗装岩机齿轮坯锻件图，锻件重量 16.7 kg，材料 45 钢。

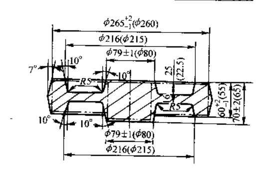


图 2.4-14　P-60B 耙斗装岩机齿轮坯锻件图

根据工艺分析采用 750 kg 空气锤镦粗，10 000 kN 螺旋压力机成形的模锻工艺、采用整体圆形模块模架、模具结构见图 2.4-15。

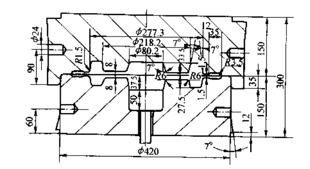


图 2.4-15　P-60B 耙斗装岩机齿轮坯锻模图

（2）连杆开式锻模

图 2.4-16 为 692Q 发动机连杆锻件图，锻件重量 1.35 kg，材料 40Cr钢。

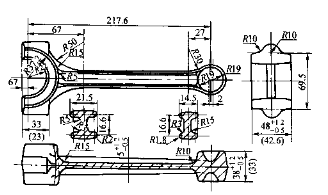


图 2.4-16　692Q 发动机连杆锻件图

根据工艺分析，采用 150 kg 空气锤固定式制坯模上先拔一端、滚挤小头，再调头滚挤大头、拔长中间、杆部、压扁大头。然后在 4 000 kN 螺旋压力机成形的模锻工艺，采用整体式矩形模块模架，模具结构见图 2.4-17。

（3）凸缘叉开式锻模

图 2.4-18 为凸缘叉锻件，锻件重量 3.4 kg，材料 45 号钢。

根据工艺分析，采用 560 kg 空气锤制坯，10 000 kN 螺旋压力机成形的模锻工艺，采用整体式矩形模块模架，模具结构见图 2.4-19。

（4）叶片精锻

图 2.4-20 所示为采用 SPM 型电动螺旋压力机所生产的叶片精密锻件，图 a 左边为终锻前的预成形工件，右边为由预成形工件经终锻所得的精密锻件。图 b 为另一种叶片精锻件。

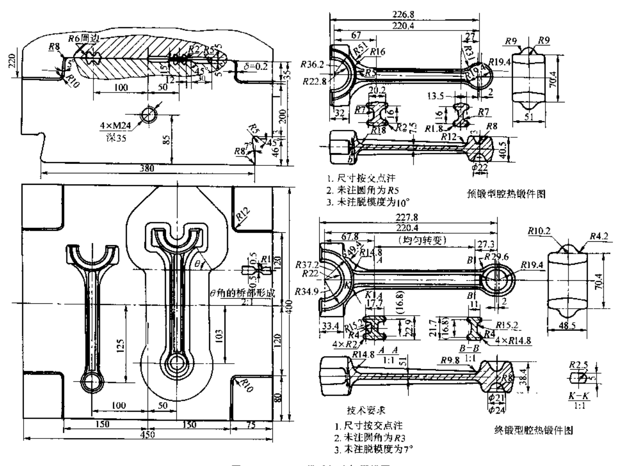


图 2.4-17　692Q 发动机连杆锻模图

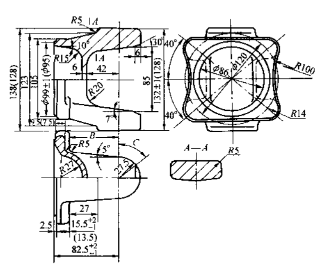
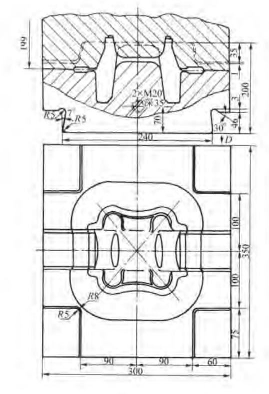
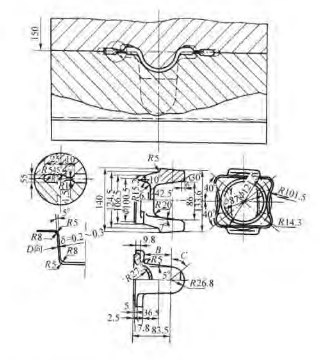


图 2.4-18　突缘叉锻件图

（在 B 段内 $R8$ 逐渐过渡到 $R5$，在 C 段内由 $R5$ 逐渐过渡到 $R3$）





技术要求

1. 本热锻模型腔按热锻件图制造，其余按图制造，制造精度为 6 级。
2. 表面粗糙度要求：型腔及桥部为 R_a 1.6μm 仓部导锁及燕尾两侧为 R_a 3.2μm，其余 R_a 6.3μm 。
3. 热处理硬度要求：工作表面硬度为 44 ～ 48HRC，燕尾部分为 38 ～ 42HRC 。
4. 在非基准面处应留有 φ15mm 浇样孔。

图 2.4-19　突缘叉锻模图



(a)　　(b)

图 2.4-20　叶片精密锻件

编写：夏巨谌（华中科技大学）



第5章　热模锻压力机上模锻

1　模锻特点与应用

热模锻压力机是与现代工业相适应的发展较快的模锻通用设备。汽车、拖拉机、农业机械、造船、铁路机车、航空、兵器等工业的发展，对模锻件提出了高质量，高精度、大批量供应和高生产率的要求。热模锻压力机设备结构和模锻工艺特点可以较好地满足现代工业提出的上述要求。

1.1　模锻特点

(1) 设备特点

热模锻压力机采用整体床身或有预应力框架式机身，宽偏心轴曲柄或斜楔机构传动导向良好可靠的滑块，行程速度较低（一般在0.3~1.5 m/s），近似静压成形。其特点如下。

1）刚性好，能承受较大的偏载。

2）设备工作时振动小，噪声低，劳动条件好，操作安全，对厂房建筑要求比模锻锤低。

3）行程固定，滑块和工作台之间的封闭高度可在一定范围内调节。

4）具有大平面尺寸的滑块和工作台。

5）具有多个工位和行程可调的上、下顶料机构。

6）便于实现锻造生产线自动化。

(2) 模锻工艺特点

由于上述设备特点，相应的工艺特点如下。

1）刚性好，锻件精度高，可调节的封闭高度，能较好控制锻件厚度公差、质量公差和使偏差分布稳定。顶料机构可以减少模锻斜度和余块。能进行开式模锻，也能进行闭式模锻如挤压、立式镦锻、多向模锻等。

2）可以安排一模多件和多模膛模锻。大平面尺寸工作台可安排2~5个工步如制坯、预锻、终锻、切边和冲孔等。由于有顶料机构一般不设夹钳料头。对小锻件可安排一模2~6件，生产率大为提高。

3）滑块行程一定，速度低，操作简单。锻件成形受操作者人为因素影响少。对操作者的操作技术要求不高。

4）热模锻压力机上模锻每个工步在滑块一次行程中完成，变形量大（锤上模锻在一个模膛内可以打击几次逐步变形和成形），需要有良好的模具设计来保证成形和锻件质量（例如解决变形量大造成折纹等）。因此，对设计工程技术人员的要求较高。正确分配变形量是工艺设计的要点。

5）热模锻压力机上模锻的锻模结构分为两部分：一是通用部分称为模架；二是根据不同锻件而设计的带有模膛的部分称为模块。

模块按工步单独设计，制造，安装在模架上。调整、更换和维修都比模锻锤方便。对于浅模膛模块，可以分为模座和镶块，镶块带有模膛，锻打一定件数后即更换，模座可重复使用。这样可节省模具钢消耗。而且镶块尺寸更小，重量轻、制造、调整、更换均方便。

(3) 采用热模锻压力机必须具备的条件

1）应具备一系列配套设备和装置。如模锻沿长度方向截面变化大的长形锻件，需配备制坯设备如辊锻机、楔横轧机、短行程快速压力机。又如采用煤气、油、煤作为燃料的加热炉加热的坯料，需要采用清理氧化皮装置，才能保证锻件表面质量，合理方法是采用高压水清理氧化皮（水压以20 MPa，时间为1~3 s为宜）。同时，设备本身需配备各种监控装置等。否则不能发挥热模锻压力机的效率和高质量、高精度的特点。

2）要配备强大的模具制造能力。即需要有制造大型锻模模架的制造设备和制造模块的精密设备。如数控模具加工设备和电火花、电解之类的电加工模具设备以及相应的检测设备。

3）热模锻压力机设备本身价格昂贵，加上必要的配套设备，制模设备，所以采用热模锻压力机上模锻一次性投资费用较高。

4）热模锻压力机设备结构比较复杂，按不同工艺配置锻压机组或生产线，维修保养要求较高。需要有良好的管理和生产秩序，合理的组织和较高的人员素质，才能充分发挥热模锻压力机模锻特点和效能。

1.2　应用范围

综上所述，热模锻压力机上模锻工艺适用于：

1）要求精度高，大批量连续生产和高生产率的模锻件；

2）多工步、多模膛、形状比较复杂的模锻件，可顺序完成模锻成形和切边、冲孔等多工步的机械化、自动化；

3）适用于各类热挤压、温挤压和多向模锻等，这类工艺在模锻锤上是不能进行的。

2　锻件分类与锻件图设计特点

2.1　锻件分类

按锻件在产品中的功能分类分为三类，即关键件、重要件、一般件。其重点在于锻件的内在质量。

按模锻件成形的工艺性和复杂性分类，这种分类与模锻工艺、模具设计和可行性紧密关联。本章采用这种分类并分析其工艺特点。锻件分类表见表2.5-1。

2.2　锻件图设计特点

锻件图设计可参考锤上模锻中关于锻件图的设计方法。但应考虑下列特点。

(1) 模锻斜度

开式模锻：热模锻压力上模锻比锤上模锻减小2°~3°。

挤压、立锻：外模锻斜度可选1°~2°，内孔可以没有模锻斜度或0°30′~1°。

(2) 公差

在加热条件比较稳定时，厚度尺寸公差可比锤上模锻提高1个档次。

(3) 冲孔连皮

冲孔连皮的形状和设计方法与锤上模锻相同，连皮厚度通常取6~8 mm，当孔的直径小于26 mm时，建议不冲出，如必须冲出，建议采用挤孔工艺。

3　变形工步及工步图设计

3.1　变形工步

(1) 第Ⅰ类锻件

这类锻件包括轴对称和平面对称件，在模锻时通常都采用镦粗工步，其作用为去除氧化皮，更重要的是镦粗后的坯料能在变形过程中充满模膛和不产生折纹。

1）第Ⅰ类第1组锻件

① 形状简单，直接终锻成形，如图2.5-1所示。



表 2.5-1 锻件分类表

类	组	主要特点	锻件示例	工艺特点
Ⅰ	1	平面投影为圆形，矩形或接近这种形状	(a)	制坯工步：镦粗
	2	平面投影为圆形，矩形或接近这种形状而结构复杂	(b)	制坯工步：镦粗，成形工步多为压入成形
	3	平面投影为圆形，矩形或接近这种形状而具有深孔或长的杆部	(c)	采用挤压成形
Ⅱ	1	具有长轴线回转体零件，沿轴向截面变化不大	(d)	制坯工步：压挤或压扁
	2	具有长轴线沿轴向截面变化大	(e)	制坯工步：辊锻，并可再采用压扁或压挤
	3	具有长轴线并带有叉形或枝叉结构的件	(f)	制坯工步：压挤，预锻工步用劈料分流
Ⅲ	1	具有长轴线带落差	(g)	沿落差转一角度平衡错移力，一般设有止推锁扣

续表 2.5-1

类	组	主要特点	锻件示例	工艺特点
Ⅲ	2	平面弯曲轴线	(h)	制坯工步：弯曲
	3	空间弯曲轴线	(i)	制坯工步：弯曲（压平）预锻要考虑分流

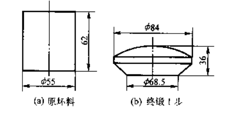


图 2.5-1　行星齿轮坯模锻工步

② 形状较简单，采用预锻（预锻类似镦粗）、终锻成形，如图 2.5-2 所示。

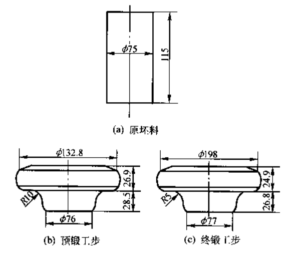


图 2.5-2　半轴齿轮坯模锻工步

③ 带孔齿轮件，采用镦粗、终锻成形，如图 2.5-3 所示。

④ 薄壁锻件，采用镦粗、预锻、终锻成形，如图 2.5-4 所示。

2）第Ⅰ类第 2 组锻件

① 叉形带不通孔锻件，采用镦粗、预锻、终锻成形，如图 2.5-5 所示。

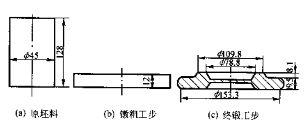


图 2.5-3　齿轮坯模锻工步

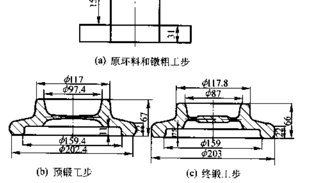


图 2.5-4　齿轮坯模锻工步

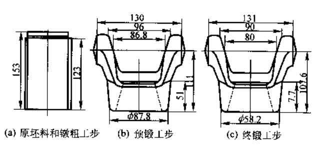


图 2.5-5　万向节叉模锻工步

② 十字形带孔锻件，采用镦粗、横向挤压、终锻成形，如图 2.5-6 所示。

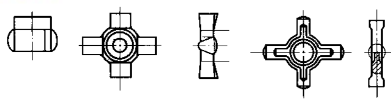


图 2.5-6 十字轴模锻工步

3）第Ⅰ类第3组锻件。这组锻件带有深孔或细长杆部。须采用挤压成形工艺。图2.5-7a ~ d是典型的深空件挤压工步图，如不采用挤压，则深孔不能模锻出来。只能采用图2.5-7a′ – c′工艺。

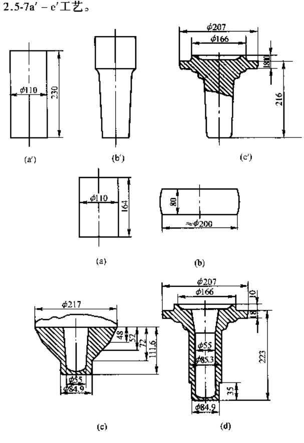


图 2.5-7 轮毂轴模锻工步

(2) 第Ⅱ类锻件

这类锻件形状为长形。其模锻工步将按照沿长度方向主要截面的变化不同而有不同的工艺。

1）第Ⅱ类第1组锻件 这类锻件，沿锻件轴向主要截面比小于1.6时，可不采用辊锻制坯工序而采用压挤工步，压挤工步压挤次数一般1 ~ 3次。如图2.5-8所示，对扁薄锻件则采用压扁工步，如图2.5-9所示。

2）第Ⅱ类第2组锻件 这组锻件沿轴向主要截面积比大于1.6。其第一制坯工序应采用辊锻机或楔横轧或快速短行程压力机完成拔长工序。

这组锻件，有时为了保证成形和内孔不产生折纹，可增加压扁工步。图2.5-11为连杆模锻工步。当采用方形坯料能较好覆盖连杆头部内孔，可不采用压扁工步。如采用圆形坯料 或为了更好覆盖内孔时，可增加压扁工步。压扁沿方坯料对角线进行。

锻件尺寸精度要求严或有质量公差要求，则可采用两次预锻工步最后终锻成形。

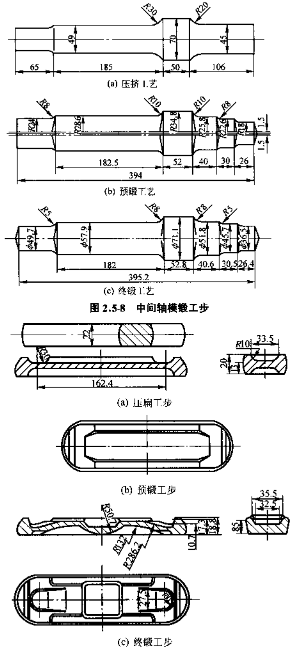


图 2.5-8 中间轴模锻工步

图 2.5-9 链板模锻工步

图2.5-10表示出压扁和双预锻工步。

3）第Ⅱ类第3组锻件。这组锻件形状一端具有叉形或枝叉。

对这组锻件应根据沿轴线主要截面变化情况按第Ⅱ类第1组或第2组的原则确定制坯工步（序）。

这组锻件由于叉形和杆部形状不同，一般应采用压扁工步，使坯料能更好地覆盖住叉形内侧模膛和杆部能放在模膛内。

这组锻件必须有预锻工步，并且枝叉部位的预锻工步设计相应于终锻工步有较大的区别，以保证金属充满模膛和锻件质量。典型锻件模锻工步如图 2.5-11 所示。

（3）第Ⅲ类锻件

这类锻件的特点是分模线或者锻件在平面投影图上呈弯曲形状。最复杂的分模线呈空间曲线。这类锻件形状复杂。成形困难、质量问题多，其工艺变化较大。

1）第Ⅲ类第 1 组锻件　这组锻件分模线呈弯曲形状，形成落差。其模锻工艺可按第Ⅱ类锻件相类似选择模锻工步。

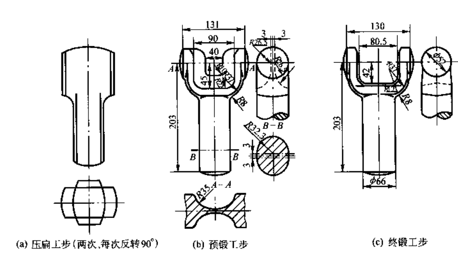
形状落差在设计中应根据锻件外形尺寸，考虑平衡落差造成的水平分力（错差力）。有三种方法。

① 一模两件，按落差方向相反排列。

② 锻件沿落差方向旋转一个角度，使两端处于同一水平位置。但两端要加大模锻斜度，即旋转角度加锻件模锻斜度。

③ 如果锻件不允许旋转，则只能采用止推锁扣，但锁扣受力大、磨损快。图 2.5-12 垂臂模锻工步为常用的锻件旋转一个角度的方法（此例旋转 16°）。

2）第Ⅲ类第 2 组锻件　这组锻件的平面投影图具有急剧弯曲的轴线必须有弯曲制坯工步，如图 2.5-13 所示。该锻件形状比较简单，若形状复杂可增加预锻工步。



(a) 压扁工步（两次，每次反转90°）　(b) 预锻工步　(c) 终锻工步

图 2.5-10　套管叉模锻工步

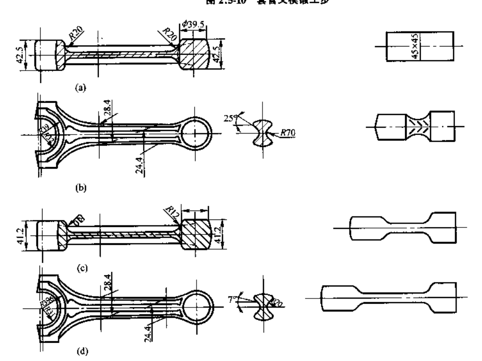


图 2.5-11　连杆模锻工步

3）第Ⅲ类第 3 组锻件　在锻件分类表上，该组的代表锻件为 6 个曲柄在空间互成 120°的曲轴。这是典型的复杂模锻件。除了分模面呈复杂空间曲面外，其各个部分的形状也很复杂。工艺和模具设计都要充分考虑如何成形充满和保证质量。

曲轴锻件的模锻工步，沿锻件长度方向的主要截面积比大于 1.6 以上，应考虑辊锻制坯。表 2.5-1 中所示曲轴，还应采用弯曲制坯工步。但如果采用方形坯料或辊锻的坯料，可采用压扁工步。其目的是减小坯料高度增大宽度，使宽度方向尽可能盖住远离主轴线的模膛。保证充满模膛和防止折纹。

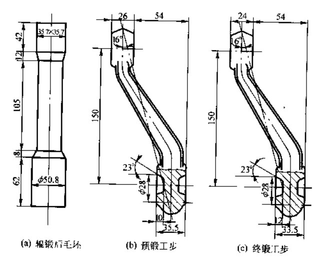


图 2.5-12 垂臂模锻工步

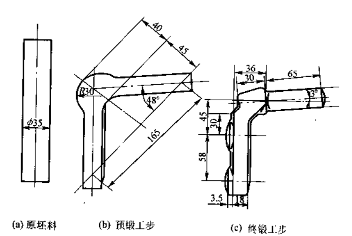


图 2.5-13 曲拐模锻工步

(4) 多件模锻

热模锻压力机模锻尺寸较小的锻件，可采用多件模锻以提高生产率和减少工步，简化制坯工步。对某些锻件，还可节约金属。

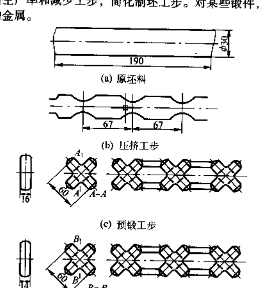


图 2.5-14 小十字轴多件模锻工步

图 2.5-14 为一次模锻 3 件。

图 2.5-15 为一次模锻 2 个叉形件，可以减少叉口飞边消耗，节约金属。

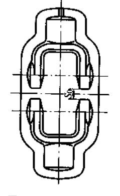


图 2.5-15 小叉形件多件模锻排列图

图 2.5-16 为一次模锻 2 件采用交叉排列。这比单件模锻节省工步（如辊锻），并节约金属。

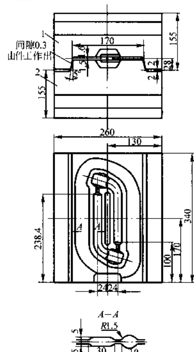


图 2.5-16　曲拐多件模锻排列图

3.2　工步图设计

（1）终锻工步设计

终锻工步设计即设计终锻热锻件图，其依据为冷锻件图。考虑要点如下。

1）热收缩率。对中、低碳素结构钢和低合金结构钢在热模锻温度时，锻件图上所有尺寸的线性热收缩率一般选用1.5%。

但对于细长杆类件或模锻工步较多，终锻温度下降到1 000℃ 以下时，其线性收缩率可选用1.0%～1.6%。同一锻件，因形状不同，可以采用不同热收缩率。如图2.5-17所示。图中尺寸220 mm及360 mm热收缩率选用1.2%。

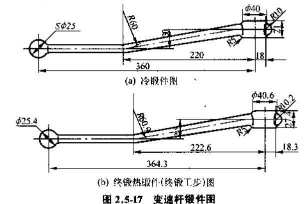


图 2.5-17　变速杆锻件图

2）锻件外形尺寸。终锻热锻件图的形状尺寸一般与冷锻件图对应。但可根据模锻情况对局部尺寸作适当修整。如图2.5-18中，台高尺寸30 mm按热收缩率1.5%在热锻件图中应为30.5 mm。而工步设计时图2.5-18b中为31.3 mm，增大0.8 mm。这是因为热切边时，凸台被凸模压塌，为了保证最终尺寸，而增加的压下余量。

（2）预锻工步设计

预锻工步设计的根据是终锻工步图。其设计要点（以Ⅲ类锻件中几种为例）如下。

1）圆形锻件　图2.5-19是具有轮毂、轮辐和轮缘的齿轮类锻件。

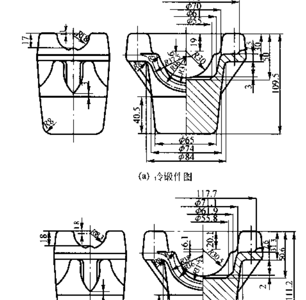


图 2.5-18　突缘叉锻件图

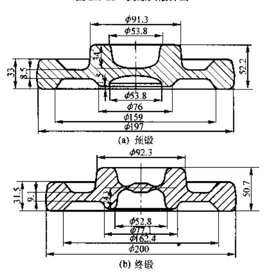


图 2.5-19　齿轮类锻件

① 为使预锻件易于放进终锻模膛。预锻件内侧尺寸应比终锻件大0.5 mm左右，如图中的 ϕ53.8 mm与 ϕ52.8 mm。外侧尺寸比终锻尺寸小0.5～1.0 mm。如图中的 ϕ91.3 mm与 ϕ92.3 mm。但是，在轮辐向轮缘过渡处，虽然这部分是内侧尺寸，预锻工步尺寸比终锻工步尺寸小。如图中的 ϕ159 mm与 ϕ162.4 mm。对于轮辐比较薄弱，轮辐和轮缘厚度相差在1倍以上更需注意，以防止产生折纹。

② 轮辐厚度尺寸。预锻工步可以和终锻工步相等或略小。图2.5-19中预锻工步为8.5 mm。终锻工步为9.1 mm，一般相差0.5～1 mm。



③ 轮毂部分，预锻工步可以比终锻工步的体积大 1%～3%。当轮辐比较薄而且比较宽时，设计应取最小值。

④ 高度方向，预锻工步尺寸比终锻工步尺寸应大 1～3 mm。

2）长轴类回转体锻件　这类锻件预锻工步宽度尺寸应比终锻工步尺寸小 0.5～1 mm。高度尺寸应大 2～5 mm。如图 2.5-20 所示，这种设计是使终锻时镦粗成形。如果原坯料或压挤后的坯料两端截面较大而总长度较短，为使坯料在预锻和终锻时流向两端充满模膛，预锻工步在两端的一段范围内其高度增大应取大值或更大值，例如可取 10 mm。

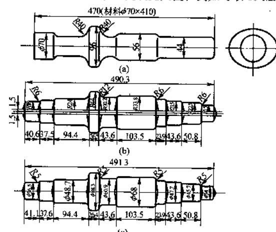


图 2.5-20　输出轴模锻工步

3）具有工字形截面的锻件　设计要如下。

高度方向，预锻工步高度尺寸比终锻高度尺寸大 2～5 mm。在工字形段可取小值。

工字形的宽度，预锻工步比终锻工步小 0.5 mm 或相同。工字形截面积预锻工步比终锻大，模锻斜度也可不同。如图 2.5-21 和图 2.5-22 中的 B—B 和 C—C 所示。工字形向两端过渡处的圆角可增大 50%左右。

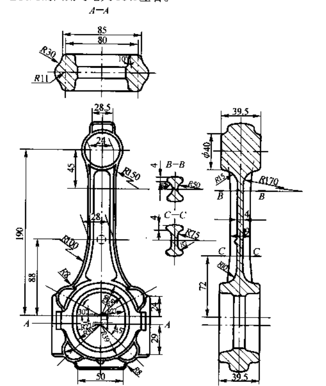
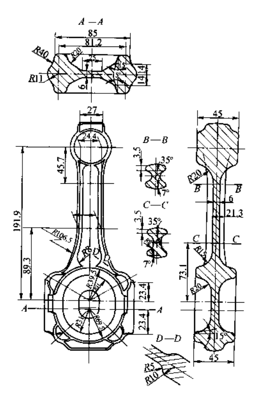
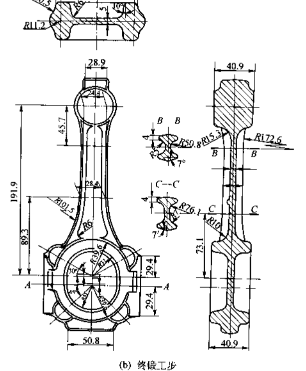


图 2.5-21　连杆（冷锻件图）



(a) 预锻工步

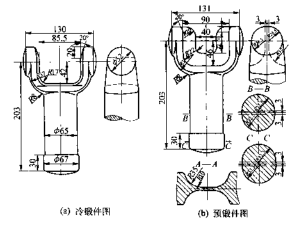


(b) 终锻工步

图 2.5-22　连杆模锻工步

4）叉形锻件　设计要点如下。

叉形部位采用劈开分流，如图 2.5-23 中 A—A 所示。劈开分流可采用大的圆角或斜面形式。本图中所示为大圆角，适用于叉形内侧尺寸较小的锻件，当叉形内侧尺寸较大，则采用斜面和大圆角过渡。劈料中间有平直段，约为叉口宽度



(a) 冷锻件图 (b) 预锻件图

图 2.5-23 滑动叉模锻工步

的1/4~1/3为宜。斜面斜度7°~10°。

(3) 制坯工步

1) 镦粗工步 一般原材料剪切下料后，端面有斜度(3°~7°之间)。镦粗后的圆饼坯料不一定是完整圆形。故建议尽可能不采用成形镦粗，特别是以料径作为定位，容易造成材料墩粗后偏向一边，使材料分布不均匀，导致锻件充不满或浪费材料。

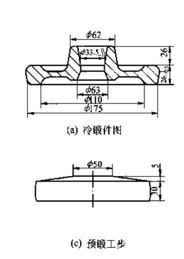
镦粗后的坯料外径尽可能接近于锻件外径。对于具有轮毂、轮辐和轮缘的齿轮锻件，应使镦粗饼能覆盖住轮缘宽度的2/3以上为好。一般镦粗饼外径比锻件最大外径小3~5 mm左右。同时要复核相当于轮毂部分镦粗后坯料的体积不小于轮毂部分的体积，可以大1%~3%，如果满足不了这一条件，则应设计成图2.5-24b的形状。

镦粗工步尺寸确定方法如下。

① 轮毂为对称的锻件镦粗工步体积校核 以 D_1 为假想外径的轮毂回转体体积 V_D 等于或略小于镦粗后相应于 D_1 为直径的圆柱体体积 V'_D (见图2.5-25a)。即

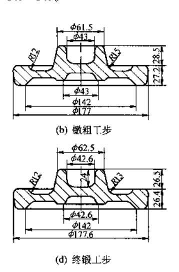
$$V'_D - V_D \leqslant (1 \sim 4)\% V_D$$

当轮毂低，圆角又较大时，V'_D 与 V_D 之差值可取小值。即1%~3%。



(a) 冷锻件图

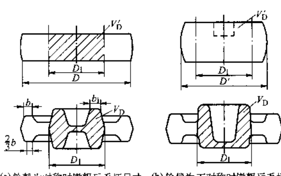
(c) 预锻工步



(b) 镦粗工步

(d) 终锻工步

图 2.5-24 常啮合齿模锻工步



(a)轮毂为对称时镦粗后毛坯尺寸 (b)轮毂为不对称时镦粗后毛坯尺寸

图 2.5-25 镦粗工步尺寸确定

如采 V'_D 过大，预锻时轮毂部分金属过多，金属先迅速沿水平方向流出，使轮缘内侧充不满，缺少金属。终锻时，飞边阻力增大，金属返流形成折纹。特别是高轮毂，薄轮辐的锻件，形成折纹可能性大。

② 轮毂为不对称时镦粗工步体积校核 图中锻件中间的孔偏向一边面且较深，为使金属能充满轮毂的顶部，镦粗后高度应适当放大。即

$$V'_D - V_D \leqslant (20 \sim 25)\% V_D$$

实际上，如果按预锻过程中坯料被压到模膛边缘外壁相接触时，这时计算体积 V'_D 与 V_D 的差值只有1%~3%左右。因为开始变形时，中间孔部位先变形，金属往外流，当坯料被冲头和上模压向四周接近轮缘外缘时，中心已被冲出一个具有一定深度的孔。这时，已冲出的部分体积应当在原计算中除去，如图2.5-25b中虚线所示。

2) 压挤工步

① 压下量 热模锻压力机滑块行程一定，压挤一次的压下量不能大于坯料高度的1/3，否则压挤后宽度与高度比大于2.5，在下一工步中易产生折纹。特别对于在同一模膛中多次压挤的压挤工步设计更要注意。

② 聚料作用 压挤模膛有一定的短程聚料作用，设计压挤工步时，在相应于锻件本体大小截面过渡处设计成斜度或大圆角过渡。如图2.5-20a，在最大高度96 mm两侧设计为大的圆角 $R40$ mm过渡，可起到一定的聚料作用，可以采用较小的坯料充满较大截面的模膛。

③ 压挤模膛形状 压挤模膛横截面形状尽可能设计成扁圆形，聚料效果良好，转90°放到下一工步模膛时，有利充满模膛。

3) 弯曲工步 设计弯曲工步，应使弯曲后坯料的厚度



比预锻模膛的宽度小。在转 90°后坯料可以完全放在预锻模膛内，处于镦粗成形。弯曲工步在相应于锻件轮廓急剧变化的部位，应尽量用大圆角圆滑过渡，以防在下一工步形成对流折纹，并且其横截面应设计成扁圆形，如图 2.5-13b 所示。

4 坯料选择

模锻件坯料尺寸的选择与锻件形状和模锻工艺有关。

4.1 计算坯料体积 V_m

$$V_m = (V_D + V_f + V_l)(1+\delta)$$

式中，V_D 为锻件本体体积，mm³；V_f 为飞边体积，mm³；V_l 为连皮体积，mm³。

飞边体积的计算，除锻件分类表中的第Ⅱ类第 3 组和第Ⅲ类第 3 组外，一般均按坯料充满飞边仓部 50%计算。第Ⅱ类第 3 组叉类锻件叉形内侧飞边按 100%充满计算，其余部位仍按 50%充满计算。第Ⅲ类第 3 组，连杆轴颈曲柄之间飞边按 100%充满，其余部分按 50%～70%充满计算。

锻件本体体积计算，应考虑欠压量，一般按锻件厚度方向正偏差之半计算。

δ 为火耗，采用中频感应加热为 1%，采用煤气、燃油、煤为燃料的加热炉加热为 3%左右。

4.2 计算坯料尺寸

（1）第Ⅰ类第 1 组和第 3 组锻件

这两组锻件多采用镦粗工步。坯料一般选取其长度与直径之比为 1.8～2.2。最大不超过 2.5，并且坯料端面斜度不超过 5°。

$$D_m = (0.83\sim0.89)\sqrt[3]{V_m}$$

式中，D_m 为坯料计算直径，mm。

（2）第Ⅰ类第 2 组锻件

这组锻件，也有镦粗工步，但镦粗变形很小，而且镦粗后坯料是平放在模膛内。一般镦粗后坯料长度比预锻模膛叉形最外侧尺寸小 2～5 mm，如图 2.5-5 所示。

坯料选择（以图 2.5-5 为例），应沿 130 mm 方向找出最大锻件截面积加上该处飞边面积进行计算。即

$$D_m = (1.01\sim1.04)\sqrt{F_{D,max}+F_f}$$

开口方向流失到飞边去，所以，叉形部分的计算截面采用叉形部位的平均截面积。叉形部分的体积应按计算的体积增大 10%～13%，作为金属流出到叉形外飞边槽的体积。

$$V_m = [V_{D,c} + V_{f,g} + (V_{D,c} + V_{f,c})(1.1\sim1.3)](1+\delta)$$

$$F_{D,c} = (V_{D,c} + V_{f,c})(1.1\sim1.3)/L_c$$

$$D_m = 1.13\sqrt{F_{max}+F_f} \quad \text{或} \quad D_m = 1.13\sqrt{F_{D,c}}$$

$$A_m = \sqrt{F_{max}+F_f} \quad \text{或} \quad A_m = \sqrt{F_{D,c}}$$

式中，$V_{D,g}$ 为锻件杆部体积，mm³；$V_{f,g}$ 为锻件杆部飞边体积，mm³；$V_{D,c}$ 为锻件叉形部位体积，mm³；$V_{f,c}$ 为锻件叉部飞边体积，mm³；$F_{D,c}$ 为锻件叉部平均截面积，mm²；L_c 为锻件叉部长度，mm；D_m、A_m 为计算坯料直径，方形边长，mm。

选择坯料时，应根据锻件沿长度方向上最大截面积或叉形部位最大截面积来选择。

多件模锻及其他类锻件的坯料选择，可按上述类别进行。

4.3 坯料选定

根据计算的坯料尺寸 D_m 或 A_m 值，按国家标准的圆钢或方钢规格选用。

选定坯料规格后，计算出坯料长度 L_m：

$$L_m = \frac{V_m}{\frac{\pi}{4}D_m^2}$$

或

$$L_m = \frac{V_m}{A_m^2}$$

坯料规格需通过调试后最终确定。

5 模锻力计算及吨位的确定

热模锻压力机上模锻时变形力的计算，是为了选用适当的设备，使生产出的模锻件的质量和精度稳定，生产率高，充分发挥热模锻压力机的优越性。

变形力的计算方法很多。多数为从事模锻生产和研究的学者、专家、技术工作者的经验公式，本章提出下列比较适用于实际的计算方法。

5.1 开式模锻算力公式之一

$$P = (50\sim70)F$$

式中，P 为变形力，kN；F 为包括飞边桥部在内的锻件投影面积，cm²。

本公式适宜于估算某种锻件变形力，初步选用某种型号的热模锻压力机。

式中系数 50～70，对于锻件形状简单，过渡圆角较大，外圆角较大，壁厚较厚，肋低而厚的可取小值。如第Ⅰ类中的轴对称锻件。对于形状复杂、扁薄，模膛窄而深，外圆角小的锻件应取大值。

5.2 开式模锻算力公式之二

$$P = WK_wF$$

式中，P 为变形力，N；F 为包括飞边桥部在内的锻件投影面积，cm²；K_w 为单位面积压力，Pa。

K_w 值可查图 2.5-26（用于长轴类锻件）和图 2.5-27（用于圆形锻件）。

图 2.5-26 根据锻件在平面图上投影的最大宽度（包括飞边桥部）B_{max} 与 4 倍飞边桥部厚度 $4S$ 的比值和 $b = 10$ mm 的交点找出 K_w 值。

图 2.5-27 根据锻件最大外径（包括飞边桥部）D 与 4 倍飞边桥部高度 $4S$ 的比值和 $b = 10$ mm 的交点找出 K_w 值。

5.3 挤压力

$$P = Wp_1F_1$$

式中，P 为挤压力，N；p_1 为单位面积挤压力，Pa；W 为温度与材料影响系数。例如：当温度为 1 200℃，45 钢则 W = 1。其余图 2.5-28。F_1 为最大挤压面积，cm²。

图 2.5-29 中，截面积为

$$F_1 = \frac{\pi}{4}d_1^2;\quad F_2 = \frac{\pi}{4}d_2^2$$

5.4 设备选择

根据上述变形力的计算，在热模锻压力机上模锻某种锻件时，选择适当的热模锻压力机。根据实践经验，公称压力应比变形力大。设备公称压力选为 1.18 倍左右的变形力为宜。

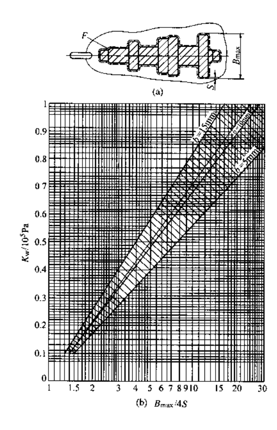


图 2.5-26　在 1 200℃时锻造长轴类锻件的单位面积变形力

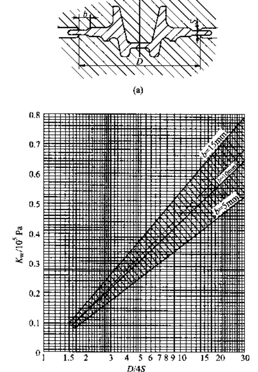


图 2.5-27　在 1 200℃时锻造圆形锻件的单位面积变形力

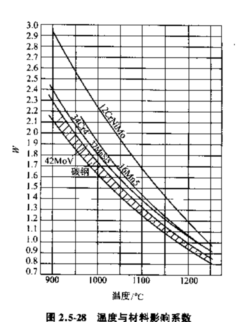


图 2.5-28　温度与材料影响系数

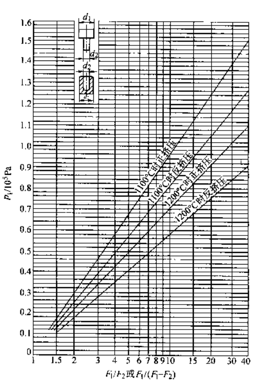


图 2.5-29　45 钢挤压时的单位面积变形力

6　锻模模架结构型式

模架是指与热模锻压力机的滑块和工作台连接并安装模膛模块的上、下模座及其全部零部件的工艺装备。

模架主要由下述部分构成：上模板，下模板，垫板，上下主顶杆，压板，螺钉，导柱、导套，刮氧化皮圈，调节件等。

6.1　模架的型式

图 2.5-30 为斜面压板式模架。

图 2.5-31 为后挡板及斜面压板的其他型式。



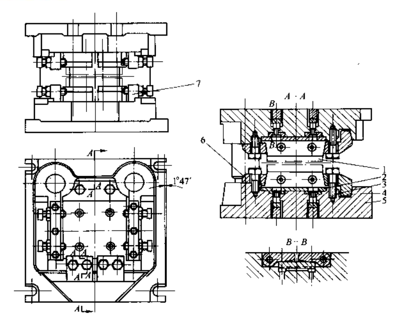


图 2.5-30 斜面压板模架
1—模具；2—垫板；3—螺钉；4—斜面压板；5—模板；6—后挡板；7—侧墙板螺钉

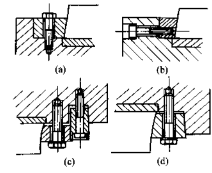


图 2.5-31 后挡板和斜面压板的其他型式
(a)、(b)后挡板；(c)、(d)前斜面压板

图 2.5-32 为大错移力较大时的侧向压紧方法。

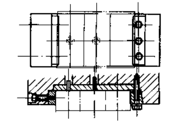


图 2.5-32 大错移力时的侧向压紧方法

图 2.5-33 为圆形锻模用的斜面压板式模架。

图 2.5-34 为键式模架。

图 2.5-35 为锁扣导向的模架。图 2.5-36 为导向锁扣局部放大图。

6.2 模架结构

在热模锻压力机上模锻，模块是经常更换的。模块一般生产几千件后即需翻新或报废。而模架则长期使用，一般模架的使用年限应在 15 年以上。因此，在模架结构设计中应当注意的以下几点。

(1) 材料

1) 上、下模板 如图 2.5-30 的件 5、图 2.5-33 的件 1 和

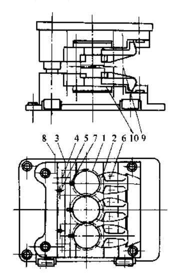
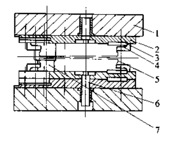


图 2.5-33 圆形锻模用的斜面压板式模架
1—下模板；2—前斜面压板；3—后挡板；
4、6、8、9—螺钉；5—销钉；7—键；10—垫板



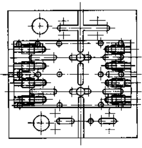


图 2.5-34 键式模架
1—模板；2—垫板；3—定位键；4—压板；
5—螺钉；6—主顶杆；7—导向装置

图 2.5-34 的件 1。这是模架的主体，必须能经受住长期使用面不失效。即具有一定的耐冲击性、较好的强度和耐磨性能。



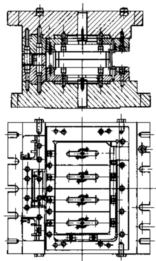


图 2.5-35　锁扣导向模架

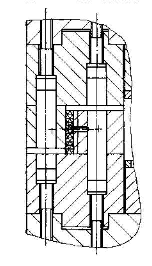


图 2.5-36　导向锁扣局部放大图

材料建议采用热作模具钢，如5CrNiMo锻钢。



模板不宜选用铸钢件。

2）垫板　如图2.5-30的件2、图2.5-33的件10、图2.5-34的件2。垫板直接和锻模接触，承受变形时的全部压力，因此，在使用一定时间后，将产生变形、磨损，是属于定期更换的零件。

垫板尺寸应设计得尽可能大，以增加与模板的接触承压面积，垫板厚度应不小于40 mm，一般以70～80 mm为宜。

3）导向装置　导向装置包括导柱、导套、衬套、刮板等。

导柱应具有较好的韧性和耐磨损。建议采用低碳合金结构钢渗碳淬火，材料如20Cr钢。

导柱和导套、刮板作相对滑动，为使其运动性能好，不容易咬合，导套、刮板建议采用铜材如锡青铜或黄铜。

（2）模架主要零、部件结构

1）顶杆结构　老式结构的热模锻压力机，设备中一般只配备上、下顶杆各一个。因此，对于多模膛模锻的锻件，有几个工步都需要顶杆时，只能采用图2.5-30中 *B*—*B* 视图以及图2.5-37所示的结构。

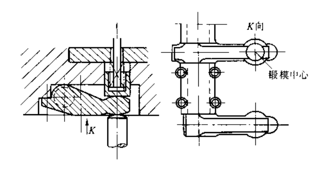
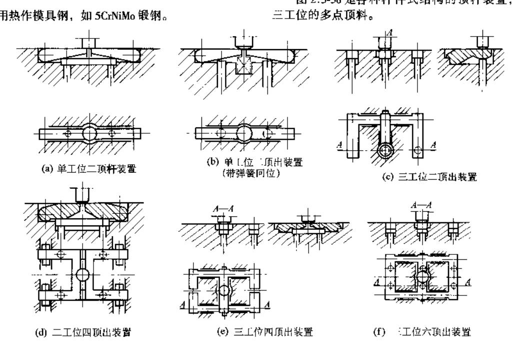


图 2.5-37　顶杆结构型式

这种顶杆结构复杂，制造、维修、更换都不大方便。

新结构的热模锻压力机，设备布置有3～4个顶杆，每一个模锻工步位置上都有单独顶杆，这样的顶杆结构简单，制造、维修、更换都比较方便。如图2.5-34的件6所示。

图2.5-38是各种杆件式结构的顶杆装置，适用于一至三工位的多点顶料。



(a) 单工位二顶杆装置　(b) 单工位二顶出装置（带弹簧回位）　(c) 三工位二顶出装置

(d) 二工位四顶出装置　(e) 三工位四顶出装置　(f) 三工位六顶出装置

图 2.5-38　顶出装置的各种杠杆式结构简图



图 2.5-39 是适用于键式模架结构中的顶杆。顶出装置行程一般为 5～20 mm。

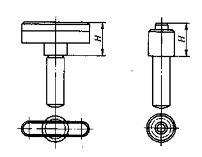


图 2.5-39 键式模架顶出装置的顶杆

2）导向装置 普通模架采用并立于模座后侧的双导向装置，如图 2.5-30、图 2.5-31、图 2.5-32 所示。导向装置结构如图 2.5-40 所示，由于该结构在磨损后修复难度较大，建议也可采用如图 2.5-35 所示的锁扣式结构。

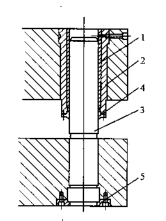


图 2.5-40 模架导向装置

1—衬套；2—导套；3—导柱；4—刮板；5—托板

7 锻模结构与模膛设计

7.1 锻模结构

锻模是指加工成模膛的模块。锻模属经常更换的部分。根据模锻件形状不同，锻模有各种不同结构，考虑锻模结构的主要因素如下。

1）模具钢消耗 模锻用的热作模具钢，含有多种合金元素，价格高，因此寿命和经济是设计模块的首要因素。

2）模具制造与维修 锻模结构必须使制造和维修方便，容易保证精度，便于装卸更新，但必须保证安全可靠。

3）锻模翻新 如果锻模结构设计合理，有些锻模可以不采用翻新而其使用效果、经济效益、制造等方面与进行翻新的锻模相似，则这种结构的设计是可取的。因为模具翻新后，定位面精度发生变化，修复困难或加工工作量大而增加制造费用。模膛翻新后，其表面硬度降低，影响模具寿命，降低经济效益。充分利用模块有效高度也是重要的。

锻模分为上、下模，其总高度（包括分模面间隙）为锻模的闭合高度，这个高度应尽可能考虑在同一热模锻压力机上可以生产锻件的大小，即模膛最大深度 h_{max} 和该处模块安全厚度 h_1，应使 $h_1 = 1.5h_{max}$，这样可以确定锻模闭合高度。

4）锻模型式

① 整体式锻模上、下锻模各为一整块，见图 2.5-41。

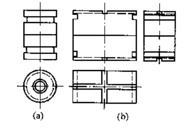


图 2.5-41 整体式锻模

② 镶块式锻模上、下模各分为两块或其中有一个分为两块，分为模座和镶块模。模座不经常更换，镶块上加工出各种模膛。

镶块模的厚度：对于闭合高度在 320 mm 以下，选用 60～70 mm。闭合高度在 400 mm 以上，选用 80～120 mm。选用原则按模膛形状及模膛最深部位的底部强度考虑。超出上述高度则不宜采用镶块模。镶块与模座之间的定位和紧固：方形和矩形镶块，如图 2.5-42a 采用长槽，b 采用方键，c 采用空心圆；圆形镶块如图 2.5-42d，d 采用圆销，e 采用窝座定位。采用窝座，加工同一基准，模膛中心与模块中心的同心度较易控制。但是，镶块相对于模块不能调整错差。

镶块与模座的连接紧固有采用螺钉，如图 2.5-42a、c、e；图 2.5-42b 则采用楔紧固。后者比较牢固可靠。

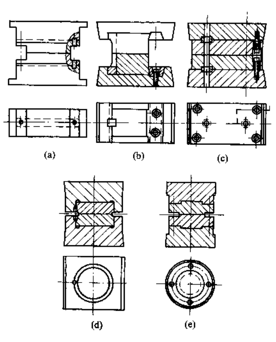


图 2.5-42 镶块结构锻模

5）锻模承压应力计算

① 模块平面尺寸。模块平面尺寸按模膛最大外形尺寸加上模壁厚度确定。

模壁厚度 s 按下式确定：

$$s = (1.5 \sim 2.0)h > 40 \text{ mm}$$

式中，h 为最外的模膛深度，mm；s 为外模壁厚度，当模膛最外处呈圆形时，系数可选 1.5。如果该处为 10°以下的斜面时，系数应取 2。

从上所述，可以计算出模块初步平面尺寸和平面面积。

② 锻模承压力计算及校核



$$\sigma=\frac{P}{F}$$

式中，σ 为模块底部所承受的单位面积压力，MPa；P 为设备公称压力，N；F 为模块底面实际承压面积，mm^2，实际承压面积为模块底面面积减去顶杆孔，键槽等不承受压力部分的面积。

σ 的数值应小于或等于 350 MPa，当大于这一数值时，应改变模块尺寸，增大承压面积。通常 σ 值在 300 MPa 为好。

7.2 模膛设计

（1）终锻模膛

终锻模膛是用于模锻件最终成形的模膛。终锻模膛设计的主要内容是确定模膛本体的尺寸，选择飞边槽，设计钳口和排气孔，确定锁扣的型式和正确布置顶料杆等。

1）模膛尺寸的确定　终锻模膛按热锻件图制造。锻压机上热锻件图的设计方法与锤锻模相同，即是将图上的所有尺寸计入收缩率而绘制的。对于钢锻件，收缩率一般为 1.2%～1.5%。

对细长或扁薄的锻件，收缩率取为 1.2%。

对于一些杆类件，模锻后还要进行校正或压印等后续工序的，应考虑这些后续工序使长度方向尺寸有少量增加，收缩率可取为 1%～1.2%。

图 2.5-43 和图 2.5-44 分别为中间轴的冷热锻件图。

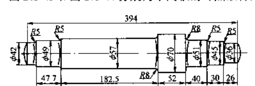


图 2.5-43　中间轴锻件图

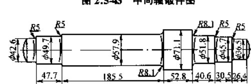


图 2.5-44　中间轴热锻件图

图 2.5-45 和图 2.5-46 分别为操纵杆的冷、热锻件图，该件细长面扁薄，且锻后还进行冷校正，故其轴向收缩率取 1.2%。

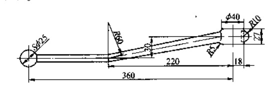


图 2.5-45　操纵杆锻件图

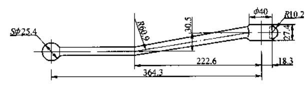


图 2.5-46　操纵杆热锻件图

设计热锻件图时除考虑收缩率外，还应考虑以下因素。

① 在切飞边和冲连皮时锻件可能产生的拉缩变形。

② 终锻模膛的局部磨损。

③ 下模腔较深处易积聚氧化皮引起锻件“缺肉”，以及锻压机和模具的弹性变形等因素。

例如图 2.5-47 和图 2.5-48 所示的突缘锻件切边时，法兰部位产生翻边变形。因此，应在变形的反方向增加 1 mm 的弥补量，即在 ϕ203 mm 与 ϕ159.4 mm 处设计成锥形。切边时，此部位被拉平。又如图 2.5-49 和图 2.5-50 所示的叉形突缘锻件的四个凸台在切边时承受主要的切边压力，由于凸台承压面积小，所以切边时受凸模压缩，高度变矮。为了保证锻件最终尺寸，设计终锻模膛的热锻件图时，四个凸台各加大 0.8 mm 作为弥补量。在模膛易磨损处，可在锻件负公差的范围内增加一层磨损量，以提高锻模的寿命。在下模膛易积聚氧化皮的部位，锻件尺寸应增加 1～2 mm 并尽可能将较深的型腔放在上模。

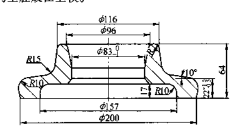


图 2.5-47　凸缘锻件图

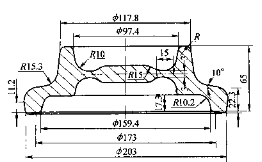


图 2.5-48　凸缘热锻件（终锻）图

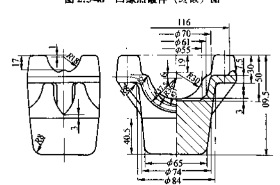


图 2.5-49　叉形突缘锻件图

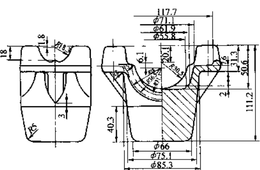


图 2.5-50　叉形突缘热锻件（终锻）图



当锻压机和模具的弹性变形量较大时，应将热锻件的高度尺寸适当减小，以抵消其影响。另外，在锻件图上应注明未注明的模锻斜度和圆角半径，尺寸注法，一般规定按交点注。对于按切点注尺寸的，最好有局部放大图。外形尺寸注在锻件最小部位（即模膛最深处），避免注在分模面上。因为分模面受多种因素影响，不宜作为测量的基准。

2）飞边槽的选定　锻压机上飞边槽的型式和锤上模锻相近，但没有承击面，飞边槽的尺寸可按设备公称压力确定。在锻压机上模锻由于采用了较完备的制坯工步，金属在终锻模膛内的变形主要是以镦粗方式进行，飞边较多地是起着排泄和容纳多余金属的作用，飞边槽桥及仓部比锤上的相应大一些，其结构型式及尺寸如图2.5-51及表2.5-2所示。型式Ⅰ使用得比较普遍，型式Ⅱ用于锻件形状较简单的情况。表2.5-2所列飞边槽尺寸适用于钢质模锻件，对一些特殊的锻件应作相应的变动。

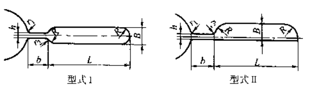


图2.5-51　飞边槽结构形式

在热模锻压力机上模锻时，锻件的高度由锻压机的行程来保证，不靠上下模面的靠合。因面滑块在下死点时，上下模面之间要有一定的间隙，用以调整模具的闭合高度，并可抵除锻压机的一部分弹性变形，保证锻件高度方向的尺寸精度。上、下模面之间留有间隙，还可防止锻压机发生“闷车”。间隙的大小根据飞边槽的高度尺寸确定，当飞边槽仓部到模块边缘的距离小于20～25 mm时，可将仓部直接开通至模块边缘。

表2.5-2　终锻飞边槽尺寸　　mm

尺寸 \ 设备公称压力/kN	10 000	16 000	20 000	25 000	31 500	40 000	63 000	80 000	120 000
h	2	2	3	4	5	5	6	6	8
b	10	10	10	12	15	15	20	20	24
B	10	10	10	10	10	10	10	12	18
L	40	40	40	50	50	50	60	60	60
r_1	1	1	1.5	1.5	2	2	2.5	2.5	3
r_2	2	2	2	2	3	3	4	4	4

3）钳口　锻压机上不一定都用钳口，因为大部分锻件很少采用夹钳头。为了检验模膛进行浇铸的浇口可以利用顶杆孔。没有顶杆孔的则要有钳口，其形状如图2.5-52所示。其尺寸为：$L=60\sim70$ mm，$b=50\sim60$ mm，或参照锤锻模确定。

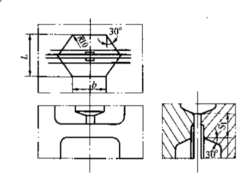


图2.5-52　钳口

4）排气孔　终锻模膛如有较深的腔，金属在滑块的一次行程中成形时，聚积在深腔内的空气受到压缩，无法逸出而产生很大的压力，阻止金属充满型腔的深处，故应在深腔中金属最后充满处开设排气孔，如图2.5-53所示。

排气孔的直径为$\phi1\sim2$ mm，孔深为5～15 mm，后端可用$\phi4\sim6$ mm的通孔与通道连通。

对环形的模腔，排气孔一般对称地设置。对深窄的模腔，一般只在底部设置一个。如模腔底部有顶出器或其他排气的缝隙时，则不需另开排气孔。

关于锁扣和顶料杆的设计见下节。

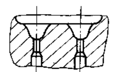


图2.5-53　排气孔设置

（2）预锻模膛

1）预锻模膛设计要点　如前所述，锻压机是靠静压力使金属变形的，而且是在一次行程中完成金属变形，因此，锻压机上模锻的一般成形规律是：金属沿水平方向流动剧烈，向高度方向的流动相对缓慢些。这就使锻压机上模锻更易产生充不满和折叠等缺陷。因此，设计预锻模膛时，除应参考锤上预锻模膛的设计原则外，还应考虑以下各点。

①预锻模膛的高度尺寸比终锻工步图相应大2～5 mm，而宽度尺寸适当减小，并使预锻件的横截面积稍大于终锻件相应的横截面积。

②若终锻件的横截面呈圆形，则相应的预锻件横截面成为椭圆形，横截面的椭圆度约为终锻件相应截面直径的4%～5%。

③应严格控制预锻件各部分的体积，使终锻时多余金属能合理地流动，避免产生金属回流、折叠等缺陷。例如对于齿轮的轮毂部分，预锻工步的金属体积可比终锻工步大1%～6%。对于需要冲孔的锻件，当孔径不大时，预锻件的内孔深度与终锻件相应内孔深度之差不大于5 mm（图2.5-54），否则终锻时内孔将有较多的金属沿径向流动，形成折



叠，当孔径较大时还必须将终锻模膛设计成带凹仓的连皮结构，以容纳连皮处多余的金属。

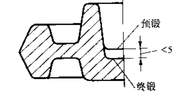


图 2.5-54

④ 应考虑预锻件在终锻槽中的定位问题。为此，预锻工步图中某些部位的形状和尺寸应与终锻件基本吻合。

⑤ 当终锻时金属不能以镦粗而主要靠压入方式充填模膛时，预锻件的形状与终锻件应有显著差别，使预锻后坯件的侧面在终锻模膛中变形一开始就与模壁接触，以限制金属径向剧烈流动，而迫使其流向模膛深处（图 2.5-55）。

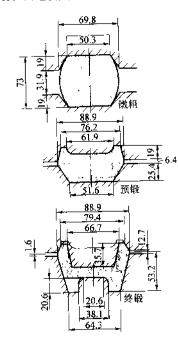


图 2.5-55　预锻件在终锻模膛中压入成形

⑥ 预锻件的圆角半径及模锻斜度设计原则与锻上模锻相同。

2）预锻模膛设计举例　下面以一般直长轴锻件，圆形锻件，具有工字形截面的锻件以及叉形锻件等为例，介绍锻压机上预锻模膛的设计。

① 直长轴件　图 2.5-56 和图 2.5-57 分别是第二轴锻件的终锻热锻件图和预锻热锻件图。

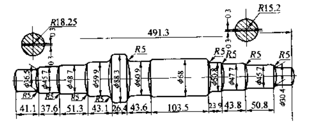


图 2.5-56　第二轴终锻热锻件图

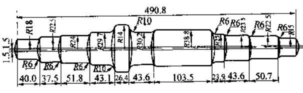


图 2.5-57　第二轴预锻热锻件图

预锻件的总长度尺寸比终锻件小 1 ~ 2 mm。其中直径最大的台阶比终锻件小 0.2 ~ 0.3 mm，最外两端台阶各减小 0.5 ~ 1 mm，其余台阶可以与终锻件相同。

预锻件的高度（模膛深度）尺寸比终锻件大，在图 2.5-57 中，高度尺寸大 1.5 mm，宽度比终锻件小 0.2 ~ 0.5 mm。

预锻件各个台阶之间过渡处的圆角半径 R 比终锻大 20% ~ 100%，视台阶的高度差而定。对于模膛底部的 r，预锻可以比终锻大 1 ~ 2 mm。

对于多台阶锻件，由于预锻总免不了有错差，在终锻时，高台阶部分容易被刮下一层而形成折叠。因此，R 应取大一些。

② 圆形件　图 2.5-58 和图 2.5-59 为圆形件终、预锻热锻件图。其尺寸关系如下：

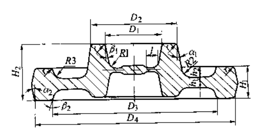


图 2.5-58　圆形件终锻件图

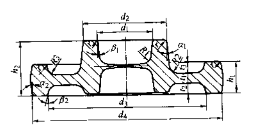


图 2.5-59　圆形件预锻件图

$d_1 = D_1 + 1$ mm

$d_2 = D_2 - (0.5 \sim 1)$ mm

$d_3 = D_3 - (0.01 \sim 0.02) D_3$

$d_4 = D_4 - (1 \sim 2)$ mm

$h_1 = H_1 + (0.5 \sim 1)$ mm

$h_2 = H_2 + (1 \sim 2)$ mm

α、β、R、r 可采用相同的数值。

取 $d_3 < D_3$ 主要是由于在锻压机上预锻时，中部金属变形大，金属快速向飞边流出，在轮缘内侧的 r_1 处往往不易充满。当轮缘较深，而 D_3 较小时应取较大差值。

R_3 和 β_2 的大小，对在这个区域是否产生折叠有很大影响，当 $\beta_2 > 30°$时和 R_3 的数值接近于 t_3 时，产生折叠的可能性小，β_2 的最佳值为 45°。

③ 具有工字形截面的锻件　图 2.5-60 是工字形截面锻件预锻和终锻设计图，其尺寸关系如下：

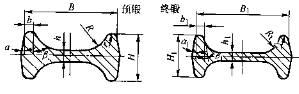


图 2.5-60　工字形断面预锻、终锻设计图

$B = B_1 - (0 \sim 1)\text{mm}$

$H = (1.05 \sim 1.1)H_1$

$h = (1.3 \sim 1.5)h_1$

$b = b_1 - 0.5\ \text{mm}$

$R = (1.2 \sim 2)R_1$

$r = r_1$

$\beta = (1.5 \sim 5)\beta_1$

β 和 R 的增大主要用于预锻变形量大，金属外流快，容易在 R 处产生折叠时，增大 β 和 R 可以减慢金属变形开始时向飞边流动的速度防止终锻时产生返流折叠。

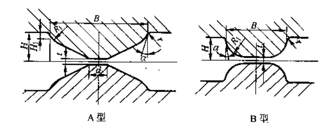


图 2.5-61　劈料模膛的两种典型设计

④ 具有叉形部分的锻件　图 2.5-61 是叉形锻件的预锻模膛设计，其关键是用劈料台预先将叉部劈开，当叉形开口较大时用 A 型，叉形开口较小时用 B 型。具体尺寸关系如下：

$$H_1 = \left(\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}\right)H$$

$$\alpha = 10° \sim 15°$$

$$d = 0.25B < 30\ \text{mm}$$

$$t = (1 \sim 1.5)h$$

$$R_1 = 10 \sim 40\ \text{mm}$$

式中，B 为终锻模膛内侧宽度；h 为飞边桥部厚度。

r 与终锻模膛相应部位 r 相同。

在设计上述两类劈开模膛时，应特别注意中间平直区如 A 型的尺寸 d 或 B 型的内侧宽 B 减去 $2R_1$ 后所余宽度。如果这部分尺寸大，在分料时，金属向两侧开始时流动太快太多。当边桥部作用增大时，将在 r 处引起严重的回流折叠而造成废品。

预锻时，为了增大对某一方向（例如叉形锻件的开口方向）金属流动的阻力，迫使金属充满模膛，常常在该方向上设置阻力沟（制动槽），如图 2.5-62 所示。锻压机上模锻时，在叉形锻件的开口方向，有时设置两条阻力沟。

第一条阻力沟长度应比叉口的内侧宽度大，距离模膛壁 10 mm 左右。

第二条阻力沟长度为第一条阻力沟的 60% 为宜，与第一条阻力沟相距约 20 mm。

阻力沟采用圆柱形。根据零件及坯料大小，采用 $\phi 6 \sim 12$ mm。

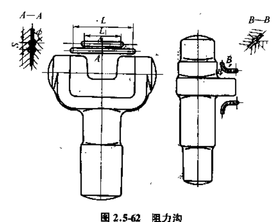


图 2.5-62　阻力沟

对于尺寸小的叉形件，为了解决金属沿叉口外流而不采用阻力沟，可以采用一模两件叉口相对排列的设计，因为这样金属不能沿叉口外流。两侧有模膛，正好利用劈料把金属分配到这些模膛中，这样还可以减少劈开模膛所须增大的坯料截面，节约材料，也能延长模具的寿命，其排列如图 2.5-63 所示。

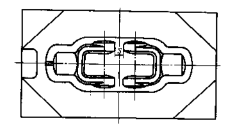


图 2.5-63　一模两件叉形件设计

⑤ 其他形状的锻件　有些锻件为避免终锻时充不满和产生折叠，预锻模膛的局部形状需作较大改变，如图 2.5-64 所示。

图 2.5-64a 在杆部向头部交接部位，如图中 $A—A$ 剖面，这是一条加强肋，预锻模膛应按 $B—B$ 剖面形状设计，即 $h_2 < h_1$，$R_2 = (2 \sim 5)R_1$。但应使 $B—B$ 剖面凸出部分的面积和 $A—A$ 剖面相应凸出部分面积近似相等。

图 2.5-64b 截面变化大，预锻模膛应作成均匀过渡。加大圆角，避免产生金属的对流形成折叠。设计中使 $R_1 = (0.8 \sim 1)R_1$，$R_2 = (2 \sim 3)R_0$，$R_5 = (0.8 \sim 1)R_4$，$R_4 = (2 \sim 4)R_3$。

图 2.5-64c 中也与图 2.5-64b 同样理由，并具有向突出的枝芽部位分料、贮料，保证有足够金属充满终锻模膛和防止在所示部位产生对流折叠的问题。$R_1 = R_2$ 可以根据枝芽突出的大小 L 来决定，可选为 $(1 \sim 1.5)\ L$。

3) 飞边槽和冲孔连皮的设计

① 飞边槽的选定。预锻飞边槽的结构形状与终锻飞边槽相同（见图 2.5-51），具体尺寸可按表 2.5-3 选定，对形状比较复杂的锻件，为了较好地充满模膛而必须增大金属外流的阻力时，桥口的宽度 b 应比该表中的数据适当增大。

② 冲孔连皮。预锻冲孔连皮按下述两种情况设计（见图 2.5-65）。

当 $D \leqslant 1.5H$ 时，采用 I 型连皮

$$S = h$$

式中，h 为飞边桥部厚度。

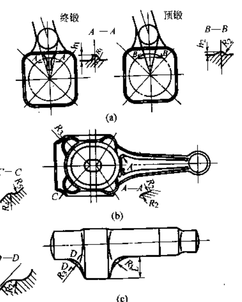


图 2.5-64 预锻模膛局部形状变化

$S_1 = (1.5 \sim 2)S$

R_1 根据 S、S_1 作图选定

$R_1 = 5 \sim 20$ mm

当用于 $D_1 > 1.5H_1$ 时，采用Ⅱ型连皮

$S = h$

$d = (1/4 \sim 1/3)D_1$

$\alpha = 5° \sim 7°$

$R = 10 \sim 30$ mm

（3）制坯模膛

锻压机上常用的制坯模膛有镦粗模膛、压挤（成形）模膛和弯曲模膛等。

1）镦粗模膛。镦粗模膛有镦粗台和成形镦粗锻模两种，分别介绍如下。

① 镦粗台。镦粗台的一般结构如图 2.5-66 所示。其上、下模的工作面是平面，用于对原坯料进行镦粗，通常用于镦粗圆形件。设计要点如下。

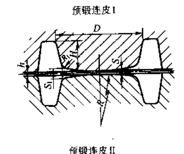
图中 H 为模具的封闭高度。在每一种模架中 H 的大小是一定的。

h_1 是下模的高度，设计时应使 h_1 的高度比预锻模膛下模块的高度高出 5 ~ 10 mm。以便将镦粗后坯料推到预锻模块上。

表 2.5-3 预锻飞边槽尺寸 mm

尺寸 \ 设备公称压力 /kN	10 000	16 000	20 000	25 000	31 500	40 000	63 000	80 000	120 000
h	3	3	4	5	6	6	7	7	9
b	10	10	10	12	15	15	20	20	24
B	10	10	10	10	10	10	10	12	18
L	40	40	40	50	50	50	60	60	60
r_1	1.5	1.5	2	2	3	3	3.3	3.5	4
r_2	2	2	2	2	3	3	4	4	4

预锻连皮Ⅰ



预锻连皮Ⅱ

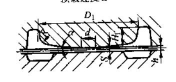


图 2.5-65 预锻冲孔连皮

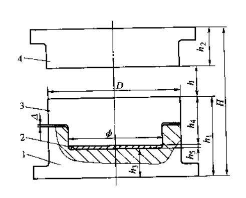


图 2.5-66 镦粗台

1—下模座；2—调整垫片；3—镦粗下模；4—镦粗上模

件 1 是不常更换件，因此，h_3 是一定的。在设计中为满足上述要求，要调节 h_4 或 h_2 来解决。件 4 也可以是不常更换件。因此，主要调节件 3 来得到。件 2 是调节垫片。当件 3 磨损后工作面需要进行翻新，h_4 变小，这时可改变 h_5 来进行调整。

件 3 的底部工作面为圆形，底面直径 ϕ 应尽可能大一些，在台阶处应保持间隙 Δ，其值为 1 ~ 2 mm。

镦粗后坯料的高度 h，可以按其外径（指自由镦粗后最大外径）比预锻模膛在分模面上的直径小 1 ~ 3 mm，一般以能放进预锻模膛即可。

② 成形镦粗模膛。成形镦粗模膛结构如图 2.5-67 所示，其作用是使成形镦粗后的坯料易于在预锻模膛中定位或有利于金属成形。



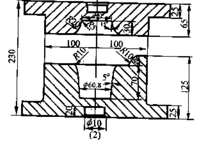


图 2.5-67 成型镦粗模膛

图中的下模上端有一段 20 mm 的凸起，是因为镦粗后坯料易卡在下模，为便于把坯料取出，该凸起可作为操作者夹钳的支点，既省力又方便。

2）压挤（成形）模膛。压挤模膛与锤上模锻的滚压模膛相似，其主要作用是沿坯料的纵向重新分配金属，以接近锻件沿轴向的截面变化。压挤时，坯料主要是被延伸，截面积减小，而在某些部位，如靠近长度方向的中部有一定的聚料作用。在一定情况下压挤可以代替辊锻。因此它在锻压机模锻中用得较多，压挤还有去除坯料表面氧化皮的作用。

当聚料区段处于长轴形件中间部位，且聚料区段长度较短时，压挤模膛的聚料作用较明显。图 2.5-68 是一个较为典型的例子。与图 2.5-56 第二轴热锻件图相比，该件模锻采用的坯料为 $\phi70$ mm。而最大截面为 $\phi87$ mm，加上飞边约为 $\phi90$ mm，经压挤后坯料能较好地满足成形要求。

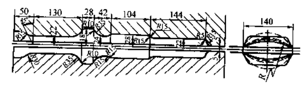


图 2.5-68 第二轴压挤模

压挤模膛设计要点如下。

① 压挤模膛的设计依据是计算毛坯图。例如，图 2.5-69 为一个长轴件的计算毛坯（直径）图，图 2.5-70 为其压挤模膛图。在计算飞边体积时，一般按仓部充满 50% 计算。但对叉形劈开件其叉口内侧应按仓部全部充满计算。对某些特殊部位也可按成形难易程度适当考虑飞边的充满百分数。

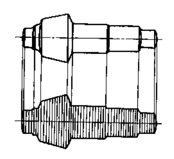


图 2.5-69 长轴件计算毛坯（直径）图

② 模膛宽度：$B=(1.6\sim1.8)d$，d 为坯料直径。

③ 模膛深度：对于受压缩产生延伸的区段：$h_1=(0.5\sim0.9)d$。h_1 不宜过小，因为一般压挤时，需要在同一模膛中进行 1~3 次，如一次压下量过大，翻转 90°。再压时易引起缺陷。

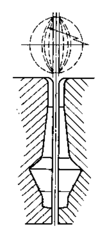


图 2.5-70 压挤模膛图

对于要求聚料的区段：$h=(1.1\sim1.3)d$

如前所述，当聚料区段处于零件中部附近，且聚料区段较短时，聚料作用较明显；当聚料区段与坯料直径的比值约为 0.6 时，坯料截面只要达到锻件最大截面的 0.65 倍就能满足聚料要求。但如聚料区段靠近锻件的一端时，则此比值应增大到 0.85 左右。如图 2.5-56，最大直径为锻件中部（$\phi88.3$ mm × 26.4 mm），但坯料选用 $\phi70$ mm。压挤模膛深为 48 mm × 2 mm（见图 2.5-68）。

④ 压挤模膛长度：一般锻压机压挤时，不另加夹钳料头。为了便于操作，可以在操作一侧把模膛开通加深，或者是在操作一侧把分模面间隙 t 增大，以不压夹钳为准，因此，压挤模膛总长度 $L\leqslant$ 热锻件长度。

压挤模膛沿长度方向深度并不应完全与计算毛坯图一致，需作适当的修改。例如，图 2.5-68 与图 2.5-56，图 2.5-56 热锻件图有 11 个不同直径排列，而图 2.5-68 只有 5 个不同模膛深度。

⑤ 压挤模膛在模膛深度变化的过渡区，过渡圆角 R_n 应尽量设计得大一些，特别是由小截面向聚料段大截面过渡圆角要加大，如可能时应设计成带斜度 α 的均匀变化的模膛深度。过渡圆角加大可以避免在预锻模膛中模锻时在过渡处产生折叠。

⑥ 上下压挤模分模面上的间隙 t 不应太小。一般为坯料直径的 12% 左右为宜。

在模膛尾部应设计或斜度 $\beta=7°\sim10°$，分模面上 r 不小于 5 mm。端面 R_t 不小于 10 mm。

压挤模膛的横截面根据模膛深度 h、宽度 B 和间隙 t 的交点作圆。当截面变化小时，可采用矩形截面。

压挤（成形）模膛具有压挤和预锻两个模膛的作用。

3）弯曲模膛。弯曲模膛的作用是将坯料在弯曲模膛内压弯，使其符合于预锻模膛或终锻模膛在分模面上的形状。

弯曲模膛的设计原则与锤上模锻相似，其设计依据是预锻模膛或终锻模膛的热锻件图在分模面上的投影形状。其设计要点如下。

① 弯曲模膛在急剧弯曲处应设计成较大的圆角，特别是弯曲处转角接近或小于 90°时，应加大转角半径 R_n，以免在预、终锻时产生折叠。

② 弯曲模膛在下模上有两个支点，以支持压弯前的坯料，并使坯料放在两个支点上时处于水平位置，如图 2.5-71 所示。

③ 弯曲模膛下模的后端应有坯料定位面，定位可以是面定式，也可以是可调整式。以后者较好。

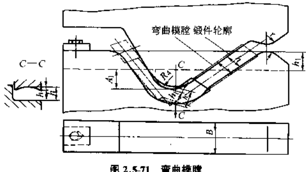


图 2.5-71 弯曲模膛

④ 手工操作的弯曲模膛应有夹钳口。

⑤ 模膛尺寸：

模膛深度：$h \leqslant (0.8 \sim 0.9)\ b_{锻}$

式中，$b_{锻}$ 为锻件相应断面位置的宽度。对于容易堆积氧儿皮和模膛较深处，h 应加大。

模膛断面，采用矩形。

模膛宽度：

用型钢时：$B = F_{坯料}/h_{min} + (10 \sim 20)$ mm

用预制坯时：$B = F_1/h_{min} + (10 \sim 20)$ mm

式中，F_1 为 h_{min} 处相应坯料模截面积，mm^2。

使 $B \geqslant F_{max}/h_2 + (10 \sim 20)$ mm

式中，F_{max} 为坯料最大截而积；h_2 为相应于最大截面积处的模膛深度。

为了更好地定位和防止压弯时坯料偏向一边，弯曲模膛的突出部分（或仅上模膛的突出部分）在宽度方向应作成弧形凹坑（见图 2.5-71)，并使 $h_1 = (0.1 \sim 0.2)h$。该式中 h 为模膛相应部分的深度。

弯曲模膛凸出于分模线部分的高度应大致相等，即 $A_1 \approx A_2$

8 实例

8.1 转向节模锻

转向节是一个复杂的叉形件，如图 2.5-72 示。

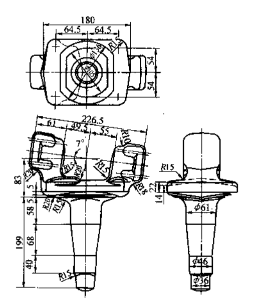


图 2.5-72 转向节锻件图

该件的工艺特点如下。

1) 该锻件是带细杆的叉形件，中间有一段高而窄、宽度较大的梯形法兰。截面沿轴向的变化很剧烈，叉部内侧宽 102 mm，外侧宽 22.7 mm。叉形两侧与轴线不完全对称。因此，为保证终锻时金属充满叉形部分模膛并在模膛内侧不产生折叠，预锻时应将坯料上端劈开。

2) 沿轴向，锻件最大截面在中间梯形法兰处，模膛深 $h = 70$ mm，宽 $b = 14$ mm，$h/b = 5$，属于难成形锻件。

从图 2.5-73 截面图上可以看出，最大截面和最小截面比约为 16.7:1。根据锻压机的一般工艺，当长形件最大截面与最小截面比在 1.6 以上时，为了合理分布材料和提高材料利用率。常采用辊锻制坏。而原材料的选定则按最大截面和相邻区段的截面变化考虑。当最大截面区域较短面相邻截面积小，则选料直径可按最大截面的 80% 选取。如最大截面靠近在一端时，则应按 92% ~ 95% 选取。

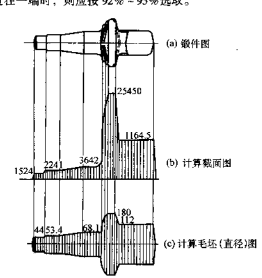


图 2.5-73 转向节截面图

转向节最大截面在锻件中部法兰处（$\phi 80$ mm 处），杆部仅为其 14.3%，叉部平均截面为其 45.9%。如按最大截面的 80% 选用原材料，相当于 $\phi 160$ mm，则下料长度只有 118 mm，其中杆部下料长度只有 22.32 mm。这样，制坯就存在很大问题。因此，该锻件的坯料选用较为特殊。

3) 对该叉形件，在预锻劈开时，金属要沿叉口开口处外流，使得向叉口两侧分流的金属减少。因此。对这类锻件，应按叉口计算的截面积增大 13% ~ 15% 才能满足成形要求。

为了解决上述三个问题，即保证法兰充满，叉部劈料和充满，同时又不出现折叠，保证杆部的充满和尽可能节约金属。该件选用 $\phi 110$ mm 的坯料，制坯选用三个工步，即沿全长压扁、转 90° 后局部压扁（相当于杆部长度），再垂直镦粗。这样可同时满足法兰和叉部成形所需的金属，然后再预锻和终锻。总共五个工步。具体设计步骤如下。

① 计算截面图（见图 2.5-73)。叉口内侧的飞边均按 100% 充满计算，面外侧按仓部 60% 充满计算，在法兰向杆部过渡处飞边仓部应按 100% 充满计算。

② 计算锻件变形力（kN)：

$$P = K_W F$$

式中，K_W 为锻件单位面积变形力，kN/cm^2；F 为锻件投影而积，cm^2。

对于叉形件，由于预锻时把叉口的金属劈开分流到两边，预锻投影面积 $F_{预}$ 按叉口内侧全部受力考虑。面终锻时



到变形终了仓部才充满，故 $F_{预}$ 则按叉口内飞边仓部50%面积受力考虑。所以 $F_{预} > F_{终}$，故 $P_{预} > P_{终}$。

本例中：　$F_{预} = 526.15\ \text{cm}^2$，$K_W = 75\ \text{kN/cm}^2$

$F_{终} = 509.1\ \text{cm}^2$　　$K_W = 75\ \text{kN/cm}^2$

所以　$P_{预} = 75 \times 526.15\ \text{kN} = 39\ 461.25\ \text{kN}$

$P_{终} = 75 \times 506.1\ \text{kN} = 38\ 182.5\ \text{kN}$

如选用 40 000 kN 热模锻压力机，虽然也符合计算要求，但两者较接近，工作中容易出现超负荷现象。因此，应尽可能选 50 000 ~ 63 000 kN 级的设备。

锻件计算重量 15.5 kg。

4）终锻模膛及其模块设计

① 热锻件图设计　按图 2.5-74，冷锻件尺寸增加 1.5% 的热收缩率。

② 飞边槽选定　按表 2.5-2，40 000 kN 级选用：h = 5 mm，b = 15 mm，r_1 = 2 mm，L = 50 mm。

采用上、下模开仓部的型式，这是由于沿轴向截面差较大，且又不能采用辊锻制坯，所以将 L 加大以贮存多余金属。如图 2.5-75 所示。

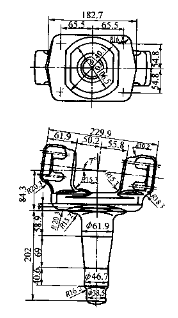


图 2.5-74　转向节热锻件（终锻）图

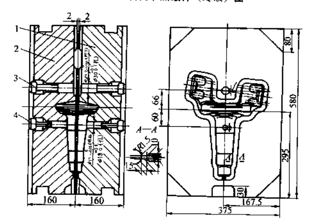


图 2.5-75　转向节终锻模
1—上模；2—下模；3—顶杆；4—托板螺钉

③ 模膛中心　按热锻件投影面积，包括杆部、法兰、叉口外侧的飞边桥部和叉口内桥部和 1/2 仓部的投影面积，找出其面心即为模膛中心。模膛中心在距叉口中心 66 mm 处。

④ 模块尺寸的确定　模块高度，根据模膛深度，模块底厚及模架封闭高度确定。40 000 kN 压力机模架的封闭高度有 400 mm 有 320 mm 两种。

模膛最深处为 71 mm。其底部模块厚度应不小于 71 mm。因此，模块单块高度就不小于 142 mm。故可选用单块高 160 mm，即封闭高度为 320 mm。

模膛壁厚，由于叉口处宽度最大且为方形，所以，为保证壁厚强度，按此处模膛深度确定壁厚。选用壁厚 $S = 1.8h$。h 为叉口模膛深度。最后，选定模块宽度为 375 mm。模块长度，在前端，根据模膛长度加上模膛壁厚（取为模膛深度的 2 倍），再加钳口，得出前端长度（即从横向键槽中心到前面）为 275 mm，后端根据模架垫板上的固紧方式要求，定出长度尺寸。并进行模块底面承压面的强度校核。选用标准模块 540 mm × 375 mm × 160 mm。

承压面强度校核：$F_{底} = 180\ 654\ \text{mm}^2$　$P = P/F = 40\ 000 \times 10^3_{底}/180\ 654\ \text{MPa} = 221.4\ \text{MPa}$

$P < 300$ MPa，符合要求。

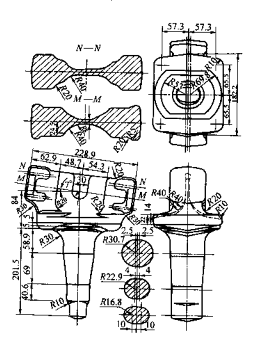


图 2.5-76　转向节预锻热锻件图

模块与模架的垫板采用十字键定位。为了增加模块强度，十字键槽应尽可能不开通。本例纵向键槽由于垫板及顶杆结构是开通的，而横向键槽不开通。紧固方式采用压板式。

⑤ 顶杆　根据锻件形状，在叉口部位，必须有顶杆才能使锻件退出模膛。为了顶杆作用力的平衡，在杆部设置另一顶杆。

叉部顶杆采用 ϕ30 mm（该部分顶出力大），杆部采用 ϕ18 mm。顶杆全部用托板螺钉托住。

5）预锻模膛及其模块设计

① 预锻热锻件图设计按图 2.5-76。

② 叉口开挡 B = 103 mm，模膛深 H = 33 mm 所以采用 A 型劈料模膛。

$$H_1 = \frac{1}{4}H = 8.25\ \text{mm}\quad 取为\ 8.5\ \text{mm}$$

α 取为 10°，$d = 0.25B = 25.75$ mm，取为 30 mm，

$t = (1 \sim 1.5)h = 5 \sim 7.5$ mm 取为 8 mm，$R_1 = 40$ mm



其他部分：

叉形部分外侧比终锻模膛小 1 mm。

法兰部分宽度比终锻模膛小 0.5 mm，高度高 5 mm。

杆部直径小 0.5 ~ 2.9 mm。正常设计小 0.5 mm 即可，而本例，为保证 ϕ36.5 mm 处的充满，经过制坯的坯料比较短而高。向杆部尾端流动太快，容易造成缺料和充不满。所以把直径减小而把模膛深度加深 1.5 ~ 7.6 mm。

杆部总长也比终锻模膛小 0.5 mm。

③ 飞边槽按表 2.5-3　40 000 kN 级选用

$h = 6$ mm，$b = 15$ mm，$r_1 = 3$ mm，$L = 50$ mm。

由于制坯工步形状和锻件沿纵向截面变化较大，飞边槽有较大的变化（图 2.5-77 中阻力沟处变化较大）。

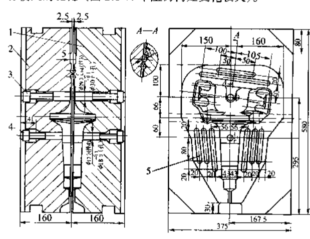


图 2.5-77　转向节预锻模

1—上模；2—下模；3—顶杆；4—托板螺钉；5—阻力沟

③ 模膛中心与终锻模膛相同。

④ 模块尺寸、定位。紧固方式均与终锻模相同。

⑤ 顶杆结构、分布位置与终锻模相同。

⑥ 阻力沟。由于预锻时，叉口金属变形流动量很大，要保证法兰部位在终锻时充满在叉口与法兰和杆部过渡处，设置 2 条和 3 条阻力沟，如图 2.5-77 所示。

叉口阻力沟必须配置 2 条。实践证明仅采用一条阻力沟时充满情况不好，而采用第二条阻力沟后，情况大为好转。

杆部阻力沟，由于经过二次压扁后的坯料应放在杆部模膛中，压缩高度大，横向流出多，为减少这种流动，迫使金属沿纵向流动。设计了 3 条阻力沟，效果较好。阻力沟的形状和尺寸见图 2.5-77。

6）制坯模膛设计。如前所述，该锻件采用三个制坯工步。

工步 1：沿 ϕ110 mm × 285 mm 的坯料全长压扁，形状如图 2.5-78 工步 1 示。在图 2.5-79 的位置 1 上整根棒料压扁，由 ϕ110 mm 压成高 72 mm。

工步 2：局部压扁，把经过工步 1 变形的坯料翻转 90°，在图 2.5-79 的 2 处进行局部压扁，如图 2.5-78 工步 2 所示。

工步 3：局部成形镦粗。把经过工步 2 的坯料垂直插入图 2.5-79 的 3 处的模膛内进行局部镦粗，如图 2.5-78 工步 3 所示。

模膛主要尺寸的确定原则如下。

第一次压扁后厚度比终锻模膛的叉口部位厚 2 ~ 4 mm，使第三次局部成形镦粗后的宽度能覆盖住预锻模膛叉口型腔的 1/2 以上。

第二次压扁时工具采用圆弧截面，其目的是坯料翻转 90°放入模膛时，由于坯料侧面成鼓形，可增加其稳定性。

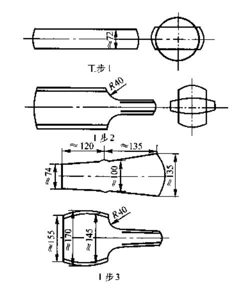


图 2.5-78　转向节制坯工步图

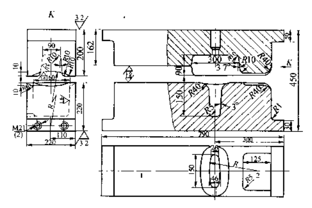


图 2.5-79　转向节制坯模模膛

第三次局部镦粗只限制坯料厚度，而使宽度尽可能地增加。下模膛设计与第二次压扁模膛形状相似。过渡圆角取 R40 mm，略大于锻件相应处尺寸，以避免模锻时产生折叠。预锻时此 R40 mm 处为定位基准。

图 2.5-80 中，件 1 ~ 9 是模块附属机构。件 7、8、9 用于整体压扁时坯料后定位。件 9 有一处斜面使压扁时不致于压出台阶来。件 6 由件 5 支持，在变形时受力压下弹簧。外力消失时，弹簧回位，这样，有利于操作和第二次压扁时坯料处于上下模中间位置。工步 3 上模应有顶杆将坯料顶出模膛。

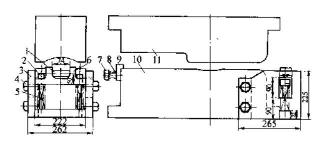


图 2.5-80　转向节制坯模装配图

1—转轴；2、4、7—螺钉；3—支持框架；5—压缩弹簧；6—托架；8—弹簧；9—定位块；10—制坯下模；11—制坯上模



8.2 轮毂模锻

(1) 锻件特性

锻件如图2.5-81所示，下面将该零件的主要技术要求介绍如下。

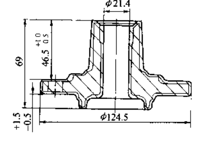


图2.5-81 锻件图

1) 该零件的锻造复杂程度等级：S3级。

2) 锻件的加工余量：单边1.5~2.0 mm。

3) 锻件尺寸公差：如图2.5-81所示。

4) 壁厚差：不大于1.6 mm。

5) 模锻斜度：3°。

从图2.5-81可以看出，该零件最难成形的部分将是锻件上直径为21.4 mm的直通孔及其壁厚差的保证。

(2) 工艺方案的制订

如图2.5-81所示，该锻件锻造难度较大，采用单一的模锻方法来生产是无法满足要求的。这是因为，根据传统的设计经验，采用开式模锻，要想在锻件上锻出直径在30 mm下的直通孔是不可能的，因而该零件的成形难点也就集中在直径为21.4 mm的直通孔如何做出上。采用开式模锻加挤孔的复合成形工艺来生产该零件是可行的，具体方案是：剪床下料、电加热、镦粗、预锻、终锻、挤孔、热切边，锻件上直径为21.4 mm通孔采用挤压成形工艺来完成。其中镦粗、预锻、终锻三工步安排在20 MN锻压机上完成，挤孔和热切边在一台2.5 MN压床上采用一套联合模来完成。坯料采用感应加热，效率高，能更好地保证锻件的表面质量，镦粗，预、终锻放在20 MN锻压机上，这无论是从锻造力，零件厚度尺寸精度，模具的布排等方面根据前面几节所介绍的方法来进行计算都是没有问题的。按前面的方法计算坯料的规格为 ϕ60 mm×135 mm。

(3) 工步图的设计

1) 挤孔工步图的设计。挤孔工步主要是采用正挤压成形的方法来完成锻件上直通孔的成形。理论上讲，终锻件芯部容纳的多余金属是完全可以被挤入锻件本身的，但是为了保证锻件在挤孔完成后能够完全充满挤孔凹模，以获得饱满的锻件形状，通常要保留15~20 mm厚的连皮在挤孔完成后被切除掉，因此，该工步的工步图设计如图2.5-82所示，图中细线所示形状是终锻件相应部位的形状，挤孔时保持不变。

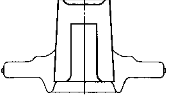


图2.5-82 挤孔工步图

2) 终锻工步图设计。终锻工步设计应遵循以下原则：一是除通孔外锻件上其他形状都要在终锻时完成；二是制订合理的终锻件高度。终锻件若过高，会容纳较多的金属，挤孔时会有更多的金属被挤入锻件本体，造成锻件高度超差或有更多的金属在挤孔完成后被切除而造成浪费；终锻件高度若过低，又会造成挤孔后锻件底部充不满及高度尺寸偏小而产生废品，造成更大的损失。因此，进行终锻件设计时应根据等体积的原则进行，同时考虑到生产有关因素的影响，可适当将终锻件体积增加1%左右。计算时，可将锻件分成两部分，如图2.5-83所示，细线所示的不变形部分与图2.5-82细线部分的体积相等，粗线所示部分的体积与图2.5-82粗线部分的体积相等。两者相加，再增加1%即为终锻件的体积，据此计算出终锻件的高度。

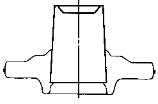


图2.5-83 终锻工步图

3) 镦粗、预锻工步图设计。这部分设计相对来讲要容易得多。值得注意的是设计镦粗模时要充分考虑镦粗饼在预锻模型腔内的定位；设计预锻件图时，其体积可比终锻件大2%~5%左右，同时预锻件某些部位可以进行简化，以提高模具寿命和简化模具制造，尺寸缩放原则参照工步图设计规则进行到底，该零件的镦粗、预锻两工步的工步图如图2.5-84和图2.5-85所示。

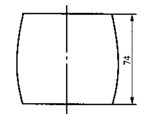


图2.5-84 镦粗工步图

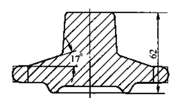


图2.5-85 预锻工步图

(4) 模具结构

1) 预、终锻模采用镶块式结构，如图2.5-86和图2.5-87所示，由于上模型腔较浅而下模型腔较深，故上模镶块厚度取60 mm，上模镶块厚度取80 mm，镶块采用H11材料制造并进行表面氮化处理，底座采用5CrNiMo制造，上下底座厚度均为70 mm；镶块和底座之间采用圆形窝座定位，镶块和底座之间采用螺钉紧面，为了减少错模，预、终锻模都增加了圆形锁扣，如图2.5-88所示。

2) 挤孔、切边采用一套联合模完成，模具结构如图2.5-89所示。为了增加上下模的对中性，在模具结构上增加了导柱；挤孔工位采用退料板退料，切边工位采用弹簧退料。挤孔冲头采用H11材料制造，硬度为55~60HRC，在工作过程中还必须对冲头进行冷却，以延长其寿命。

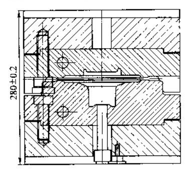


图 2.5-86　预锻模

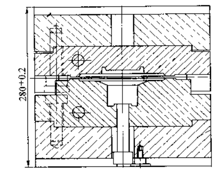


图 2.5-87　终锻模

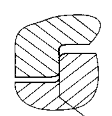


图 2.5-88　预、终锻模锁扣

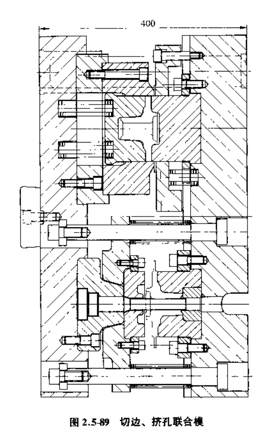


图 2.5-89　切边、挤孔联合模

8.3　曲轴模锻

曲轴是典型的空间曲面分模锻件，沿轴线其截面变化剧烈，锻造难度大，技术含量高，下面以一六缸曲轴为例对其工艺、工装设计进行介绍。

（1）锻件图的设计

设计的锻件图如图 2.5-90 和图 2.5-91 所示。

1）模锻斜度。因平衡块型腔深而窄，最深处达到 80 mm，为了减少机加工余量建议模锻斜度用 3°或更小。

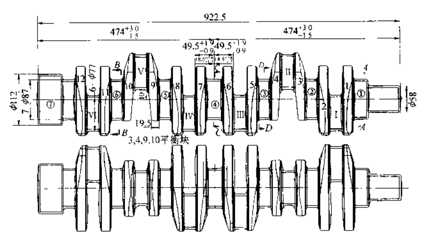


图 2.5-90　曲轴锻件图

2）余量。轴向 3 mm，主轴颈 3 mm，连杆颈 3.5 mm，平衡块侧面 1 ~ 1.5 mm。连杆径处的余量适当增加是为了防止曲轴存在轴向弯曲而导致加工不出成品。

3）分模面选取。连杆颈的位置如图 2.5-90 所示，为了使上下模型腔深度基本上相同，连杆颈处分模面建议作如图 2.5-91 所示处理，同时可减少平衡块侧面加工余量。

（2）材料规格及吨位确定

1）材料规格：简单实用的方法是按该类零件最大截面面积加上飞边面积，取之和的 60% ~ 70%，来确定材料规格，经计算，该零件材料规格为方 125 mm。



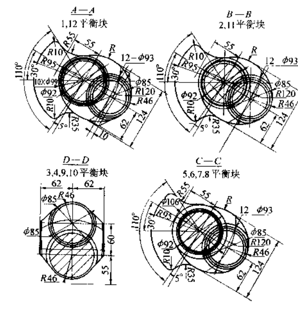


图 2.5-91 曲轴截面图

2）设备吨位的确定。按其水平投影面积再乘以相应的系数，计算得出吨位为 98 MN，故应选用 120 MN 设备生产。值得注意的是由于模具桥部高度较大，系数取 4～5 比较切合实际。

（3）工艺方案

该零件沿轴向截面积变化大，应有制坯工序，同时制坯后还应考虑坯料在预锻型腔内的定位，故该零件的工艺方案为：辊锻制坯—压扁—预锻—切边—热校正。增加热校正的目的是为了消除切边后的变形，保证零件的直线度。工艺安排如下：采用 ϕ930 mm 辊锻机辊锻制坯，压扁、预锻、终锻安排在 120 MN 热模锻压力机上，热切边在 12.5 MN 压床上完成，热校正在 16 MN 液压机上完成。

（4）工步图设计及模具结构设计

1）辊锻。沿轴线方向计算出各段的面积并进行简化，同时为保证各个平衡块的充满，将平衡块对应部位适当加长 10～15 mm，辊坯图如图 2.5-92 所示；模具结构如图 2.5-93 和图 2.5-94 所示；为避免辊锻时挤出飞刺，边缘圆角取 $R10$ mm，同时为增加辊锻时坯料在型腔内的稳定性，在型腔底部增加与坯料圆角相适应的导向沟槽。

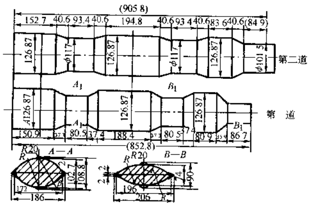


图 2.5-92 辊坯图

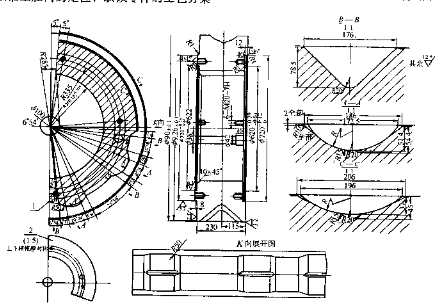


图 2.5-93 第一道辊锻模具图

2）压扁。主要考虑坯料在预锻型腔内定位和有效覆盖预锻型腔，同时为避免出现折叠，局部圆角应加大至 R50～100 mm，模具结构如图 2.5-95 所示。

3）预锻。

① 预锻型腔。设计预锻件时要充分考虑分料、积料以保证终锻时锻件的充满，同时要考虑怎样最大限度地延长模具寿命，设计的预锻件图如图 2.5-96 和图 2.5-97 所示，厚度方向比终锻大 2 mm，轴向内侧大 0.5 mm，外侧小 0.5 mm，保证预锻件能顺利放入终锻模膛内，宽度方向小 1.0 mm，各圆角半径较终锻大 2～3 mm，热收缩率取 1.5%，同时针对上述提出的问题分别采取以下措施。

a）避免法兰端部形成折叠，由于剪切下料端面的不平整，锻造时可能会在端面形成折叠，采取的措施是将法兰端面设计成如图 2.5-98 所示形状。

b）解决充不满的措施主要是考虑平衡块的充满，在相应的地方应采取必要措施来储料，该曲轴采取的措施如图 2.5-97 所示。

② 模具结构。模具导面如图 2.5-99 所示，四周边缘为

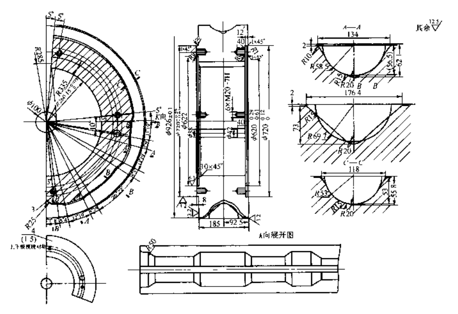


图 2.5-94 第二道辊锻模具图

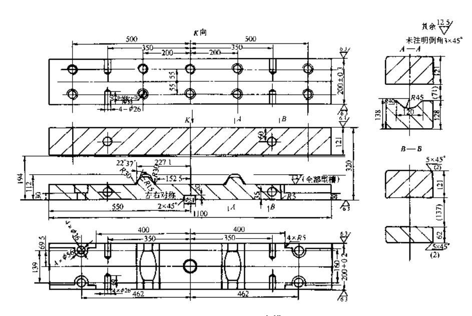


图 2.5-95 压扁模

R8 mm，桥部宽度为 24 mm，高度为 8 mm，上下模各设置 8 个顶杆，顶杆行程 35 mm，模具材料采用 5Cr2NiMoVSi。

4）终锻。

① 锻件图。在冷锻件图上加放 1.5%的热收缩率即可，如图 2.5-100 和图 2.5-101 所示。

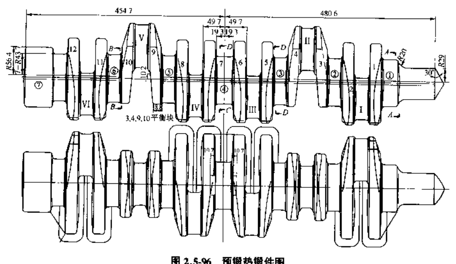
② 模具结构。模具结构基本与预锻相同，模具材料采用 5Cr2NiMoVSi，如图 2.5-102 和图 2.5-103 所示，不同之处是模具边缘圆角为 R3 mm，桥部宽度为 18 mm，高度 6 mm。

5）切边。

① 切边模有凸、凹模、凹模固定器、底座组成，凸、凹模形状和轮廓与终锻件保持一致，凸模与锻件纵向台阶应留有间隙，避免压伤锻件，间隙一般取 1～2 mm。

② 凸凹模之间也应留有间隙，避免模具在工作过程中相互碰撞而损坏模具。间隙取 0.8～1.2 mm，在凸模上作出，同时还可方便飞边的取出。切边凸、凹模和凹模固定器分别如图 2.5-104、图 2.5-105、图 2.5-106 所示。凸模选用 8Cr3 制造，凹模本体用 45 钢，刃口堆焊 CoCrW，凹模固定器采用铸钢件。

6）校正模。校正模设计以终锻件图为依据，在轴向加 0.5 mm 的间隙。上下模间隙 10 mm，模具结构如图 2.5-107 和图 2.5-108 所示。



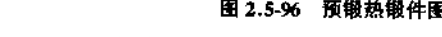


图 2.5-96 预锻热锻件图

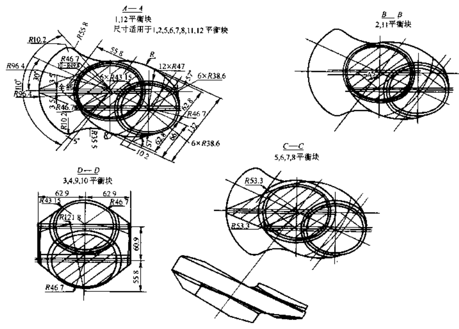


图 2.5-97 预锻截面图

图 2.5-98 预锻模具图



图 2.5-99　预锻模具导面图

图 2.5-100　终锻热锻件图

图 2.5-101　终锻截面图



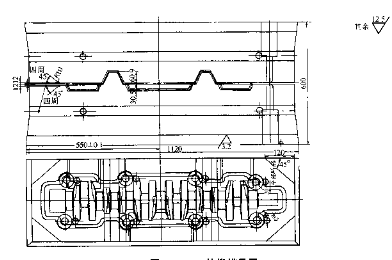


图 2.5-102　终锻模具图

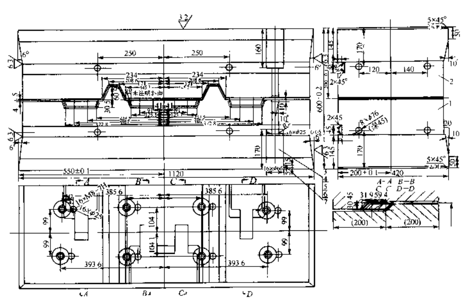


图 2.5-103　终锻模具导面图

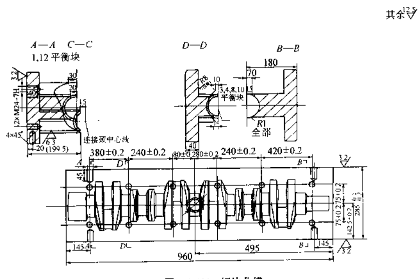


图 2.5-104　切边凸模

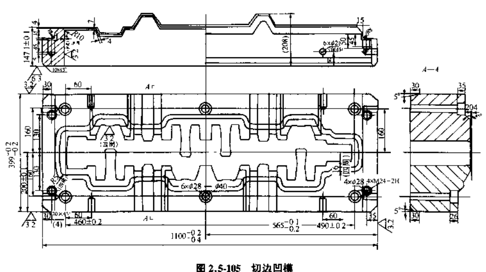


图 2.5-105　切边凹模

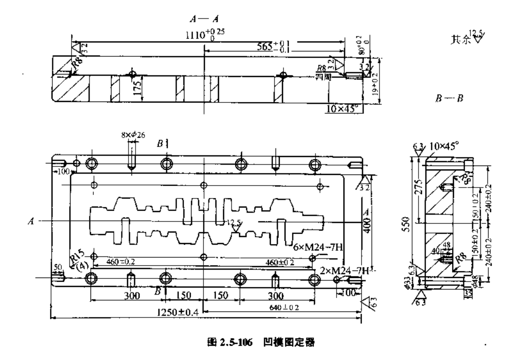


图 2.5-106　凹模固定器



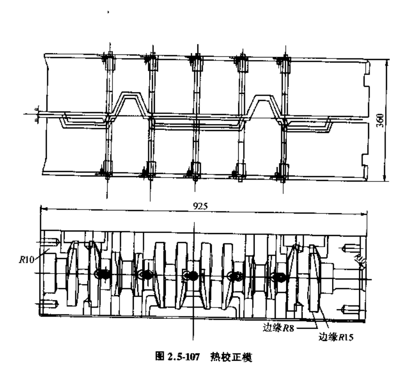


图 2.5-107　热校正模

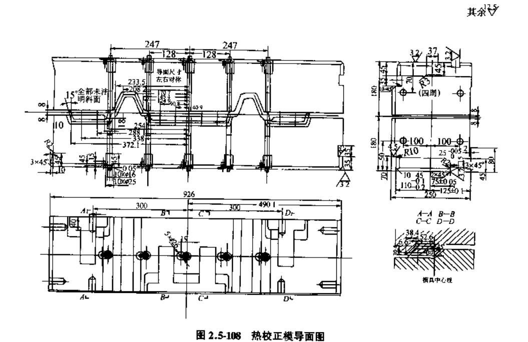


图 2.5-108　热校正模导面图

编写：瞿　良（东风汽车公司锻造厂）
吴听松（东风汽车公司锻造厂）
蔡喜明（东风汽车公司锻造厂）



第6章　平锻机上模锻

1　模锻特点及应用范围

平锻机是一种曲柄连杆传动的设备，它有两个滑块。主滑块沿水平方向运动，夹紧滑块垂直于主滑块运动方向运动。平锻机按其夹紧滑块上凹模分模面是呈垂直，还是呈水平面分成两大类。即分为垂直分模平锻机和水平分模平锻机。在汽车、拖拉机等制造行业，平锻机是一种应用较广的模锻设备。

1.1　平锻机模锻过程

平锻机有两个互相垂直的分模面，主分模面在凸模和凹模之间，另一个分模面在可分的两半凹模之间，其模锻过程如图2.6-1所示。

将加热好的棒料，放在固定凹模 M_1 的模膛内，并以前挡板或后挡板确定坯料长度 l_B，见图2.6-1a。平锻机主滑块和夹紧滑块同时运动，当凹模夹紧棒料后，见图2.6-1b，主滑块继续运动，棒料长度 l_B 部分在凸模作用下变形，金属充满模膛，见图2.6-1c和d。

1.2　主要锻造工序和应用范围

1）平锻机的主要锻造工序，见图2.6-2。

其特征工序是局部镦粗，又称聚集，其他工序还有冲孔、穿孔、卡细、扩径、切断、弯曲、挤压、成形等。

将上述工序按照一定顺序加以不同的组合，就能制出各种形状的锻件。

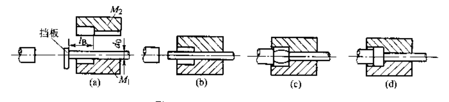


图2.6-1　平锻机模锻过程简图

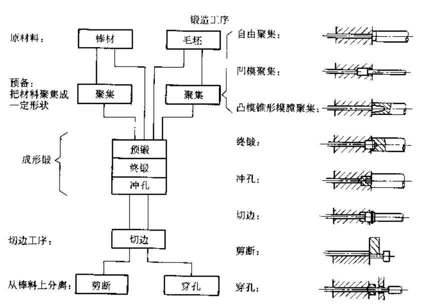


图2.6-2　平锻机主要锻造工序

2）主要应用范围

① 棒料或管料的局部镦粗成形工艺。

② 冲孔和逐渐冲孔的深孔成形工艺。

③ 水平分模平锻机的挤压和双向模锻工艺。

1.3　平锻机的模锻特点

1）能锻出两个不同方向上具有凹挡或凹孔的锻件。

2）进行长杆类锻件和长杆空心锻件的模锻，以及进行深冲孔和深穿孔工序。

3）模锻斜度较小，或无模锻斜度。

4）可进行切边、剪料、弯曲、热精压等联合工序，不需另外配压力机。

5）可用长棒料进行多件模锻，节省棒料剪切的劳动量。

6）水平分模平锻机可以进行热挤压工艺和双向模锻工艺。

7）模具可采用组合式或镶块式。

8）平锻时震动及噪声较小，劳动条件好，易实现机械化操作。



2 平锻件分类及其工艺特点

如表 2.6-1 所示。

表 2.6-1 锻件分类及其工艺特点

类别		简图	工艺特点
第一类：具有粗大部分的杆类锻件	无孔类		1）原材料直径按锻件杆部选用 2）多为单件，后挡板定位模锻 3）模锻工步为聚集、预锻、终锻 4）开式模锻时有切边工序
	不通孔类		基本同上
第二类：通孔或不通孔类锻件	通孔类		1）原材料直径尽量按孔径选用，且要满足镦粗比 2）多为长棒料、前挡板定位连续模锻，即一料多件 3）模锻工步为聚集、冲孔、预锻、终锻、穿孔
	无孔或不通孔		1）原材料直径由工艺需要选用 2）多为长棒料，前挡料连续模锻 3）主要工步为聚集（冲孔）、预锻、终锻、切断
第三类：管料镦粗锻件			1）原材料直径按锻件杆部的管料规格选用 2）基本上是单件，后挡板定料模锻 3）加热部分的长度不能过多地超过变形部分尺寸 4）主要工步为聚集（增加管壁厚度）、预锻、切边、终锻
第四类：挤压件			
第五类：联合模锻件			根据锻件形状、尺寸，可选在平锻机上制坯，再在其他设备上成形，也可选在其他设备上制坯，再在平锻机上成形或用不同设备成形锻件的相应部位

3 锻件图的绘制

绘制锻件图的依据是产品零件图，锻件图是锻造厂（车间）的主要技术文件，根据它来验收锻件是否合格和进行模具设计。

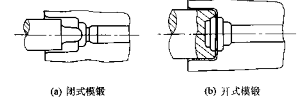
锻件图既要满足零件图和机械加工的要求，又要符合平锻机生产所能允许的技术条件。锻件图必须经和冷加工工厂（或车间）会签后方能生效。

锻件图的主要内容包括确定分模面形式和位置，加工余量和锻件公差，模锻斜度和圆角半径，锻件技术条件等。

3.1 确定分模面形式和位置

1）分模面形式。平锻机上可采用闭式模锻和开式模锻。

① 闭式模锻，见图 2.6-3a。对于使用前挡板的零件，因为能控制变形金属的体积，因此大多采用闭式模锻，其优点是不需要切边工序，但一般易产生纵向毛刺，纵向毛刺必须用砂轮机磨掉。



(a) 闭式模锻　　(b) 开式模锻

图 2.6-3　平锻分模面形式

② 开式模锻，见图 2.6-3b。对于使用后挡板或钳口挡板的零件，大多采用开式模锻。开式模锻产生横向飞边，这是因为棒料的直径和长度公差影响变形金属的体积，另外，对于形状复杂锻件，虽然使用前挡板，但也采用开式模锻，因为这时需要增加阻力，以便使金属充满模膛。

2）分模面的位置，见图 2.6-4。分模面应该设置在锻件的最大轮廓处，它分为如下三种情况。

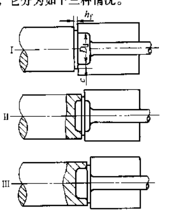


图 2.6-4　分模面的位置

① 分模面设置在最大轮廓的最前端。优点：凸模结构简单，锻件的头部和杆部不偏心，对于非回转体锻件，可以简化模具制造和安装调整工作。缺点：在切边工序易拉出纵向飞边。

② 分模面设置在最大轮廓的中部。优点：切边时锻件飞边切得干净，一般说来，飞边设置在离凸模方向 10～15 mm为宜。缺点：凸模和凹模调整不当时，易产生错差，并且要求终锻模膛和切边模膛有较好的同轴度。

③ 分模面设置在最大轮廓的后端。优点：由于锻件都在凸模内成形，锻件内、外径和前后台阶同轴度好。缺点：锻件在切边模膛内很难定位，并且锻件和坯料之间易产生错差，一般很少采用。

3）横向飞边尺寸，见图 2.6-4 和表 2.6-2。

表 2.6-2　横向飞边尺寸　　mm

D_d	<20	20～80	80～160	160～260
C	5	8	12	15
h_f	1.5～2	2～4	3～5	4～6

3.2 锻件的机械加工余量和公差

（1）机械加工余量

机械加工余量的确定与锻件形状的复杂程度、成品零件的表面粗糙度、平锻机的吨位等因素有关。因此，锻件余量可根据平锻机的吨位来选择，查表 2.6-3，但是还应考虑下列因素。

表 2.6-3　平锻机模锻件机械加工余量

平锻机吨位/kN	2 250～6 300	8 000～16 000
加工余量/mm	1.5～2	2～2.5

1）当零件的表面粗糙度在 R_a1.6 μm 以上时，在表 2.6-3 的余量基础上增加 0.5 mm。

2）应考虑各种公差值，其中应特别考虑错差，直线度等。

3）加热方式：例如火焰炉加热产生脱碳和氧化皮多，应适当加大余量。

加工余量大小最终由用户认可。

（2）锻件公差

影响公差大小的因素有锻件尺寸、镦锻部分重量、材质及锻件镦锻部分的复杂系数。

锻件各类公差的具体数值查 GB/T 12362—1990 标准确定或由用户要求确定。

3.3 模锻斜度和圆角半径

（1）模锻斜度（表 2.6-4）

由于平锻机具有"有效后退行程"，所以锻件外径在主滑块运动方向的模锻斜度为零，其他模锻斜度也很小；而夹紧滑块运动方向的模锻斜度 α 和 β 则需较大值。

表 2.6-4　模锻斜度

1）凸模内成形模锻斜度 γ

简图				
（d，H，γ）	H/d	≤1	>1～3	>3～5
	γ	0°15′	0°30′	1°

2）锻件内孔模锻斜度 θ

简图				
（d_k，H，α）	H/d_k	≤1	>1～3	>3～5
	θ	0°30′	0°30′～1°	1°30′

3）锻件夹紧方向内模锻斜度 β、α

简图				
（β，h，R，α，C，D，H）	C	≤10	>10～20	>20～30
	β	5°～7°	7°～10°	10°～12°
	α	3°～5°	3°～5°	3°～5°

(2) 圆角半径（图 2.6-5）

圆角半径大小影响锻件的加工余量大小和模具使用寿命。

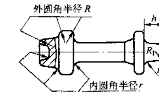


图 2.6-5 内圆角及外圆角半径

1）外圆角半径 R

$$R=\frac{a_1+a_2}{2}+S$$

式中，a_1、a_2 为组成圆角相邻两边的余量值；S 为零件的倒角值或圆角半径。

一般应使 $R\geqslant3$ mm，按上式计算的圆角半径过小时，可以加大相邻两边的余量以增大外圆角半径，若不加大余量，而过分增加圆角半径，就会过多地缩减圆角部位的加工余量，并且容易引起由于黑皮而产生废品。

对于挤压成形部位的外圆角半径 R_1

$$R_1=0.1h+1\ \text{mm}$$

式中，h 为挤压部位的深度，mm。

2）内圆角半径 r

① 一般 $r\geqslant3$ mm，但 r 不可过大，否则将增大加工余量，也增加锻件重量。

② 对于挤压成形部位的内圆角半径 r_1

$$r_1=0.2h+1\ \text{mm}$$

式中，h 为挤压部位的深度，mm。

3.4 锻件技术条件

1）未注明模锻斜度和圆角半径。
2）残留飞边和纵向毛刺。
3）表面缺陷深度，小于或等于锻件加工余量之半。
4）错差：小于或等于锻件加工余量之半。
5）锻件表面清理：抛丸或抛砂。
6）热处理硬度：调质、正火或控温冷却。
7）锻件重量。
8）其他：形位公差等。

以上各项技术条件大部分均可在 GB/T 12362—1990 标准上查找到具体数值。最终均由用户来认可。

4 镦锻力计算和平镦机规格选择

4.1 镦锻力的计算公式

(1) 概略计算公式

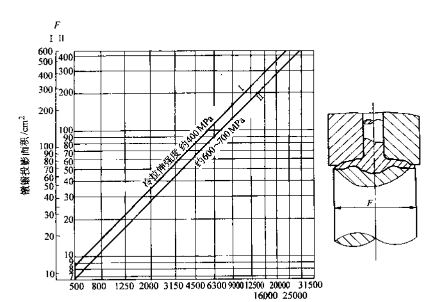
$$P=57.5KF$$

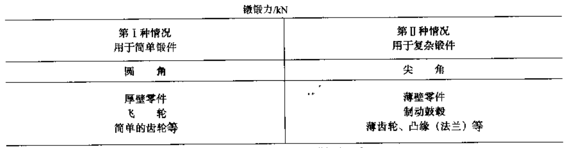
式中，P 为镦锻力，kN；F 为锻件的投影面积（包括飞边），cm^2；K 为钢种系数，见表 2.6-5。

表 2.6-5 钢种系数 K

序号	钢 种 牌 号	系数 K
1	中碳钢及低碳合金钢，如 45、20Cr	1
2	高碳钢及中碳合金钢，如 60、45Cr、40CrNi	1.15
3	高碳合金钢如 GCr15	1.30

(2) 德国奥穆科平锻机镦锻力图表（图 2.6-6）





第Ⅰ种情况 用于简单锻件	第Ⅱ种情况 用于复杂锻件
圆 角	尖 角
厚壁零件 飞 轮 简单的齿轮等	薄壁零件 制动鼓毂 薄齿轮、凸缘（法兰）等

图 2.6-6 奥穆科平锻机镦锻力图表



4.2 平锻机的规格选择

平锻机的安模空间和技术规格查图 2.6-9、图 2.6-10 和表 2.6-6、表 2.6-7。

1）首先计算锻件终锻时的镦锻力，初步选定平锻机规格。

2）根据锻件形状、尺寸和工步数计算凹模体的宽度或高度，核对所选平锻机的安模空间宽度或高度。若计算值大于初选平锻机安模空间宽度或高度，则要加大平锻机规格。

3）根据坯料镦粗长度 l_B，核对所选平锻机的全行程和有效行程。对于用前挡板定位的锻件，必须保证在凸模内聚集的镦粗长度 l_{Bm} 符合如下公式。

$$l_{Bm} \leqslant S - (100 \sim 150)\ \text{mm}$$

式中，S 为平锻机的全行程，mm。

4.3 举例

图 2.6-7 是汽车变速箱第一轴锻件图，选择合适的平锻机。

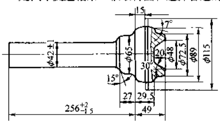


图 2.6-7　第一轴锻件图

1）首先计算锻件终锻时的镦锻力

锻件投影面积 $F = \dfrac{\pi}{4}D^2 = \dfrac{\pi}{4} \times 11.5^2\ \text{cm}^2$

$= 104\ \text{cm}^2$

式中，D 为锻件最大直径（包括飞边）。

查图 2.6-6 奥穆科平锻机镦粗力图表，得需镦锻力 7 800 kN。

初选 9 MN 水平分模平锻机。

2）估算凹模体宽度 C（设计成通用标准件）。

$$C = [D_{max} + 2\ (0.1D_{max} + 10)]\ n + 2 \times 40\ \text{mm}$$
$$= [115 + 2\ (0.1 \times 115 + 10)] \times 5\ \text{mm} + 80\ \text{mm}$$
$$= 870\ \text{mm}$$

式中，D_{max} 为锻件最大直径（包括飞边），$D_{max} = 115$ mm；n 为工步数，经设计计算第一轴锻件需要 5 个工步，见图 2.6-8，$n = 5$；2×40 mm 为凹模体镶块窝座的横向两端的壁厚。

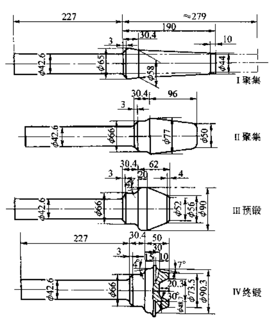


图 2.6-8　汽车第一轴工步图（热尺寸，未注明 $R5$）

查图 2.6-9 和表 2.6-6，9 MN 水平分模平锻机凹模安模空间，允许的最大模具宽度约 800 mm，故应选择 12.5 MN 水平分模平锻机，其允许的最大模具宽度约 920 mm。

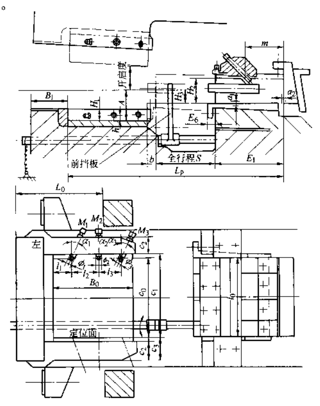


图 2.6-9　水平分模平锻机安模空间图

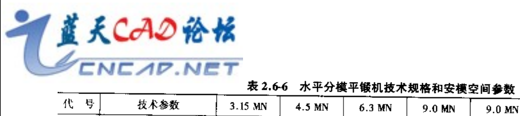


表 2.6-6　水平分模平锻机技术规格和安模空间参数

mm

代　号	技术参数	3.15 MN	4.5 MN	6.3 MN	9.0 MN	9.0 MN	12.5 MN	16.0 MN
	夹紧力/MN	3.15	4.5	6.3	11.9	9.0	12.5	21.2
	行程次数/次·min^{-1}	55	45	35	32	32	28	20
	最大棒料直径	65	80	95	115	115	140	160
	上模开启度	120	135	155	180	180	205	230
	全行程	290	330	360	420	420	460	540
	有效行程	150	170	190	215	215	245	280
	后退行程	80	75	100		108	130	
	安模空间（长×宽×高）/mm	330×380×145	400×450×170	450×530×190	530×600×220	530×600×220	600×720×250	680×760×280
	电动机功率/kW	17	37	55	37	70	95	110
L_P	闭合长度	755	860	1 020	1 155	1 270	1 500	1 585
E		1 045	1 190	1 380	1 575	1 690	1 960	2 125
E_1		315	390	450	445	560	600	720
b		10	35	120	180	180	300	70
c_0	模　宽	380	450	530	600	600	720	760
c_1		400	470	550	620	630	750	775
c_2 c_3		85 110	100 125	110 130	130 150	150 180	190 220	235 250
B_0	模　长	330	400	450	530	530	600	680
B_1		200	196	230	300	250	305	215
A	模　厚	145	170	190	220	220	250	280
H_1		60	60	下模 75 上模 78.5	90	95	100	120
H_2	夹持器高	120	140	165	185	200	230	220
H_3		60	70	82	925	97.5	115	110
l_1	模子安装孔位置	61	108	下模 138 上模 102	下模 98 上模 83	136	120	
l_2		114	142	上模 170	上模 177	194	156	上模 120 上模 540 下模 540
l_3		—	—	—	下模 364	—	214	
h		30	30	40	40	45	50	50
L_0		400	480	550	605	652.5	745	635
m		190	210	270	266	370	370	535
$\alpha_1 \times \phi_1$	模子安装孔尺寸	25°×ϕ40	25°×ϕ45	25°×ϕ45	20°×ϕ60	25°×ϕ50	0°×ϕ50	上模 0°×ϕ55
$\alpha_2 \times \phi_2$		0°×ϕ28	0°×上模 ϕ30 下模 ϕ35	0°×ϕ35	0°×ϕ50	0°×ϕ36	25°×ϕ50	—
$\alpha_3 \times \phi_3$		—	—	—	30°×ϕ60	—	0°×ϕ50	45° 上模 ϕ55 下模 70×45
a_1	上下调正量	±2	±2	±2.5	±5	±3	±25	7
a_2	前后调正量	±5	±6	±4	±10 −5	±5	±7	+20 −5
	外形尺寸（长×宽×高）/mm	2 440×2 160×2 420	3 900×2 450×2 440	4 320×2 700×3 100		6 540×3 370×3 630	7 650×3 830×4 150	
	地面以上高度	2 170	2 220	2 360		2 680	2 600	
	机器总重量/t	21.4	34.6	48.5		87.2	131.8	

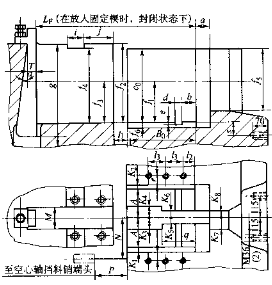


图 2.6-10　垂直分模平锻机安模空间

表 2.6-7　垂直分模平锻机技术规格和安模空间参数

公称压力/MN		2.25	5.0	8.0	12.0	12.5	20.0
主滑块全行程/mm		220	280	380	500	460	610
夹紧滑块行程/mm		85	125	160	215	220	312
夹紧机闭合后主滑块有效行程		110	190	250	318	310	340
夹紧模开启前主滑块后退行程		50	30	130	175	170	140
主滑块行程次数/次·min^{-1}		60	45	35	27	27	25
凹模空间（长×宽×高）/mm		320×140×360	450×180×435	550×210×660	660×260×820	700×260×820	850×320×1030
进料窗口尺寸（宽×高）/mm		90×300	150×410	190×610	235×735	265×780	330×980
电动机	型　号		JH82-8	JR-92-8		JR-127-10	JR-128-8
	功率/kW	14	28	55	80	115	155
机器总重量/t		19	40.2	87	120	136.2	256.4
外形尺寸（长×宽×地面上高/总高）/mm		3 250×2 860×/2 028	4 845×3 015×1 985/2 350	5 215×3 930×2 296/3 040	6 145×4 380×/3 700	6 345×3 930×3 000/3 680	8 620×5 185×3 140/4 140

吨位/MN 尺寸/mm	2.25	5.00	8.00	12.00	12.50	20.00
L_P	745	1 005	1 205	1 419	1 420	1 720
a	70	100	90	110	60	
b	70	55	101	127	127	
d	20	24	50	50	50	
l	7	7	10	10	10	
c_0	360	435	660	820	820	
f_1	200	195	310	415	415	
f_2	385	460	695	845	845	
f_3	200	195	310	415	415	
f_4	360	440	685	834	820	
K_5	25	45	60	80	85	
K_6	30	60	60	80	85	
K_7	60	100	120	155	170	
K_8	30	50	70	80		
B_0	320	450	550	660	700	
l_1	65	110	175	219	180	
l_2			95	120		
l_3			170	215		

吨位/MN 尺寸/mm	2.25	5.00	8.00	12.00	12.50	20.00
f_5	300	400	610	735	780	
f_6	20	25	25	25	20	
g	450	560	800	980	980	
i	75	90	80	100		
j	142	165	340	380	380	
A	140	180	210	260 (290)	260	320
K_1	25	25	25	25		
K_2	20	35	25	25		
K_3	50	70	110	160		
K_4	55	85	110	160		
M	100	120	200	250	230	254
N	195	230	310	370		
P	150	195	140	108		
q	160	210	220	290		
r			60	58		
S		60	70			
T	65	54	80	90	98	
α		7°	7°11′	7°		

5 镦粗（聚集）规则

平锻机上坯料镦粗（聚集）是重要的制坯工步，它的优劣直接影响锻件的成形和质量。

圆棒料聚集方式一般有三种：自由聚集、凹模内聚集和凸模的锥形模膛聚集。对于一个锻件，工艺方案确定后，就可确定终锻的形状和尺寸，选定坯料直径，根据终锻的体积，就可计算出该坯料的镦粗长度和镦粗比。镦粗比是镦粗规则中重要的技术参数，决定聚集坯料的形状和尺寸。

$$l_B = \frac{V_A(1+\delta)}{\frac{\pi}{4}d_0^2}$$

$$\varphi = \frac{l_B}{d_0}$$

式中，l_B 为坯料的镦粗长度，mm；V_A 为锻件终锻时的体积，mm³；δ 为加热烧损率，其中火焰加热为 3%，电感应加热为 1% ~ 1.5%；d_0 为坯料直径，mm；φ 为坯料的镦粗比。

5.1 自由聚集规则

1）定义。自由聚集是指坯料在一次镦粗行程，可获得任意形状尺寸，而不弯曲和扭曲，如图 2.6-11 所示。

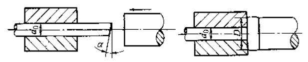


图 2.6-11 自由聚集

2）自由聚集允许的镦粗比 φ_g。一次镦粗不可太长，否则要产生弯曲和扭曲。只有当坯料的镦粗比 φ 小于允许镦粗比 φ_g，才能进行自由聚集，如表 2.6-8 所示。

表 2.6-8 自由聚集的允许镦粗比 φ_g

冲头形式	平冲头		冲孔冲头	
棒料直径/mm	$d_0 \leqslant 50$	$d_0 > 50$	$d_0 \leqslant 50$	$d_1 > 50$
棒料下料斜度 0° ~ 3°（锯）	$\varphi_g = 2.5 + 0.01d_0$	$\varphi_g = 3$	$\varphi_g = 1.5 + 0.01d_0$	$\varphi_g = 2$
棒料下料斜度 3° ~ 6°（剪）	$\varphi_g = 2 + 0.01d_0$	$\varphi_g = 2.5$	$\varphi_g = 1 + 0.01d_0$	$\varphi_g = 1.5$

表中 φ_g 值是假设为坯料加热均匀情况，如果加热不均匀，则应取小值。允许镦粗比 φ_g 是坯料聚集的重要参数，其作用是：若 $\varphi > \varphi_g$ 时，则需采用聚集工步。

5.2 凹模内聚集规则

当镦粗比 $\varphi > \varphi_g$ 时，可在凹模内聚集。

由镦粗比 φ，查图 2.6-12 凹模内聚集限制界线，可得直径增大比 $m = \frac{d}{d_0}$，从而可计算出聚集后的直径 $d = md$。

凹模内聚集易产生纵向飞刺，一般情况下不采用。其优点是一次聚集的坯料较多。

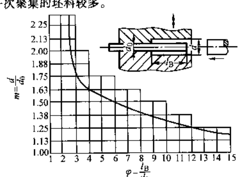


图 2.6-12 凹模内聚集限制界线

5.3 锥形模膛聚集规则

锥形模膛聚集如图 2.6-13 所示。

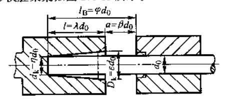


图 2.6-13 锥形模膛的相对尺寸

(1) 锥形模膛聚集的优点

在实际生产中，多采用锥形模膛聚集，其主要优点如下。

1）锥形模膛形状有利于金属聚集。

2）锥形模膛带有斜度，坯料压缩后脱落的氧化皮，可由凸模的锥形斜面滑出。

3）锥形坯料端面平整无毛刺，给下道工步创造了有利条件，以保证锻件质量。因此，在平锻工艺程序中，第一工步一般都采用锥形模膛聚集。

(2) 锥形模膛聚集规则

要获得形状匀称的锥体坯料，主要取决于锥形模膛大头直径 D_k 和镦粗压缩量 a，两者之一过大时，坯料要发生弯曲或扭曲，而合理的锥形模膛大头直径 D_k 和镦粗压缩量 a 又取决于锻件镦粗比，其值可由图 2.6-14 查得。

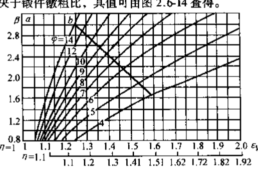


图 2.6-14 锥形模膛聚集限制线

1）锥形模膛限制线 由图 2.6-13 得：锥形模膛的相对尺寸 $D_k = \varepsilon_k d_0$，$d_k = \eta d_0$，$l = \lambda d_0$，$a = \beta d_0$，$l_B = \varphi d_0$。

根据坯料镦粗部分的体积和锥形模膛体积相等可得：

$$\frac{\pi d_0^2}{4} l_B = \frac{\pi}{12}(D_k^2 + D_k d_k + d_k^2)\, l$$

将以上相对尺寸代入上式，得：

$$\varphi = \frac{1}{3}\lambda(\varepsilon_k^2 + \varepsilon_k \eta + \eta^2)$$

因为 $\lambda = \varphi - \beta$（见图 2.6-13）



所以 $$\beta=\varphi\frac{\varepsilon_k^2+\varepsilon_k\eta+\eta^2-3}{\varepsilon_k^2+\varepsilon_k n+\eta^2}$$

设 $n=1$ 这种锥形称为计算锥形。

将 $n=1$ 代入上式得：

$$\beta=\varphi\frac{\varepsilon_k^2+\varepsilon_k-2}{\varepsilon_k^2+\varepsilon_k+1}$$

由该式可知，对于一定的 φ 值，可以作出一族 β 和 ε_k 的函数曲线，如图 2.6-14 所示。

限制界线：根据试验和生产实践，当 $\varphi>\varphi_g$，$D_k\leqslant 1.5d_0$，则 $a\leqslant 2d_0$；$D_k\leqslant 1.25d_0$，则 $a\leqslant 3d_0$，这样聚集的锥体形状匀称。

由（$\varepsilon_k=1.5$，$\beta=2$）和（$\varepsilon_k=1.25$，$\beta=3$）可作出锥形模膛聚集界线，如图 2.6-14 所示。

生产实践证明这条限制界线是较合理的。若超过限制线，即系数 β 或 ε_k 之一超过限制线，或者两个系数同时采取极限值，在聚集过程中，会造成生产不稳定，使坯料产生扭曲和弯曲，而且在终锻时产生折纹。所以在聚集工步设计时，应严格控制系数 β 和 ε_k。

2）大镦粗比锥形模膛聚集限制线。当 $\varphi>7$ 时，特别是当棒料直径小于 $\phi 40$ mm，镦粗不稳定，建议在图 2.6-14 锥形模膛聚集限制线之下取较小值，或者按图 2.6-15 大镦粗比锥形模膛聚集限制线，该限制线经生产中使用，聚集稳定，效果较好。

使用图 2.6-15 大镦粗比锥形模膛聚集限制线的注意事项：选定的系数 β 不能超过图 2.6-14 锥形模膛聚集限制线，当棒料直径 $d_0>50$ mm 时，选取的系数 ε_k 值可以超过极限值，但超过部分不能大于 0.05。

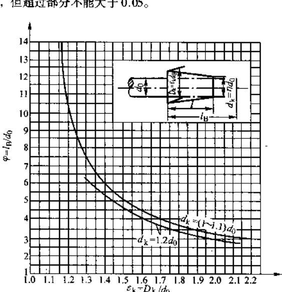


图 2.6-15 大镦粗比锥形模膛聚集限制线

5.4 管料镦粗（聚集）规则

管坯料镦粗（聚集）规则分为自由聚集规则和管料聚集规则。

（1）管料镦粗（聚集）方式

一般有五种方式。

1）管料的内径 d_0 保持不变，增加外径 D_0，如图 2.6-16a 所示。

2）管料的外径 D_0 保持不变，缩小内径 d_0，如图 2.6-16b 所示。管料的外径被模具夹持着，镦粗稳定性好。

3）既增大外径 D_0 又缩小内径 d_0，如图 2.6-16c 所示。

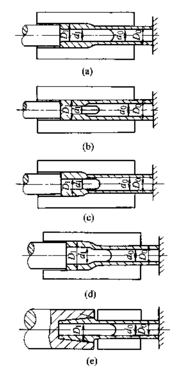


图 2.6-16 管料镦粗方式

由于内外径都呈自由状态，稳定性差。

4）同时增大外径和内径，如图 2.6-16d 所示。管料内外径同时增大，内壁不易产生凹陷，也不易产生折纹，镦粗稳定性好。

5）在凸模的锥形模膛镦粗管料，如图 2.6-16e 所示。这种方式的最大优点是不产生纵向毛刺，锻件的端面不会产生折纹，而上述前四种镦粗（聚集）方式都易产生纵向毛刺，在锻件端面产生折纹。

（2）管料的自由聚集规则

1）管料的镦粗长度 l_B 和镦粗比 m

① 管料的镦粗长度 l_B，见图 2.6-17

$$l_B=\frac{V_A\ (1+\delta)}{\frac{\pi}{4}d_{0p}^{\ 2}}$$

式中，V_A 为管料锻件镦粗部分的体积，mm^3；δ 为加热时坯料烧损率，火焰加热为 3%，电感应加热为 1%～1.5%；d_{0p} 为管料的计算直径，即和管料横截面的面积相等的棒料直径，$d_{0p}=\sqrt{D_0^2-d_0^2}$；$D_0$ 为管料外径，mm；d_0 为管料内径，mm。

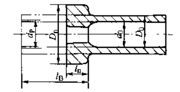


图 2.6-17 管料锻件

② 管料镦粗比 m

$$m=\frac{l_B}{d_{0p}}$$

镦粗比 m 反映了管料轴向镦粗的稳定性，m 值越大，镦粗（聚集）越不稳定。

2）管料自由聚集的允许镦粗比 m_g 和自由聚集规则

① 允许镦粗比 m_g。管料一次镦粗不可太长，否则要产生内壁凹陷，使锻件产生折纹。只有当管料的镦粗比 m 小于允许镦粗比 m_g 时，才能进行自由聚集。

管料自由聚集允许镦粗比 m_g 决定于镦粗方式和管料尺寸。其计算公式如下：

$$m_g=\frac{\mu\ (D_0-d_0)}{2d_{0p}}$$

式中，μ 为管料镦粗方式系数，见表 2.6-9；$\frac{D_0-d_0}{2d_{0p}}$ 为管料的相对壁厚。

表 2.6-9　管料镦粗方式系数 μ

$\frac{D_0}{d_0}$	μ	
	管料仅缩小内径	管料仅增大外径
1.1～1.2	3	1.5
1.2～1.4	3.4	1.7
1.4～1.6	3.8	1.9
1.6～1.8	4.2	2.1
1.8～2.0	4.6	2.3
2.0～2.2	5	2.5

② 自由聚集规则。当 $m \leqslant m_g$，坯料在一次行程中可获得任何形状。当 $m > m_g$，需要聚集工步，其聚集规则如下。

3) 管料镦粗（聚集）规则。要均匀地增大管料壁厚，主要决定于自由聚集允许镦粗比 m_g 和镦粗比 m，也即决定于管料镦粗方式，管料相对壁厚和镦粗比 m。

管料镦粗的计算直径增大系数 ϵ_n 只能等于或小于图 2.6-18 管料镦粗限制线的数值，否则易产生管壁凹陷和折纹。

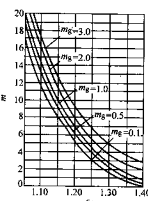


图 2.6-18　管料镦粗限制线

$$\epsilon_n=\frac{d_{1p}}{d_{0p}}=\frac{d_{np}}{d_{(n-1)p}}$$

式中，d_{1p} 为管料镦粗后的计算直径，mm。

$$d_{1p}=\sqrt{D_1^{\ 2}-d_1^{\ 2}}$$

式中，D_1，d_1 为管料镦粗后的外径、内径，mm。

6　平锻工步设计

6.1　坯料直径选择及其长度确定

坯料直径选择首先取决于镦粗比 φ，特别是对于穿孔类锻件，因为镦粗比的大小决定了聚集工步的数目。为了满足在一次加热，一套模具内完成所有工步，必须控制镦粗比大小，而且决定镦粗比大小的主要因素是坯料直径，见本章第 5 节镦粗（聚集）规则内关于镦粗比的计算公式。

(1) 锻件终锻时的体积，镦粗长度和镦粗比

1) 锻件终锻时的体积 V_A。首先根据锻件形状进行工艺方案分析，确定终锻工步的形状和尺寸，见图 2.6-19，然后计算终锻的体积 V_A。

$$V_A=(V_s+V_b+V_f+V_k)(1+\delta)$$

式中，V_s 为锻件体积，按冷锻件图名义尺寸加正偏差之半计算，mm³；V_b 为穿孔连皮体积，mm³；V_f 为横向飞边体积，mm³，飞边尺寸见表 2.6-2；V_k 为扩径部分体积，mm³；δ 为坯料加热时烧损率，也称火耗，火焰加热 $\delta=3\%$，电加热 $\delta=1\%\sim1.5\%$。

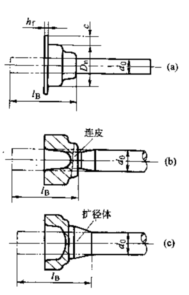


图 2.6-19　终锻工步常见形式

2) 镦粗长度 l_B 和镦粗比 φ。其计算公式见本章第 5 节镦粗（聚集）规则。

(2) 坯料直径的选择方法

1) 具有粗大部分的杆类锻件　坯料直径 d_0 按锻件杆部直径选取。

2) 穿孔类锻件（按孔径考虑）

① 选择坯料直径 d_0 的原则

a) 控制镦粗比 φ；$\varphi \leqslant 4.5$ 最好，可以保证锻件一次完成聚集、预锻、终锻、穿孔四道工步。$\varphi \leqslant 7$ 可以保证锻件二次聚集、预锻、终锻、穿孔五道工步完成。

b) 棒料直径 d_0 和卡细直径 d_c 之比 $f=\frac{d_0}{d_c}$ 称卡细率。见图 2.6-20，应尽量使 $f \leqslant 1.25$。当 $\varphi \leqslant 2.5$，卡细率可达 1.4。否则，要增加切除穿孔废芯的工序，坯料切除穿孔的废芯后，才能继续锻造。既增加工步，又切除废芯时，振动大、劳动条件差、一般少采用，常采用一根棒料锻两件（调头锻）。

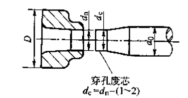


图 2.6-20　棒料卡细



c）有深孔而又较复杂的锻件如图 2.6-21 所示，锻造时，应力求不产生金属倒流，否则增大冲孔变形力，缩短模具寿命，在锻件内孔也易产生折纹。应符合截面相等原则。

$$d_0 = (1.05 \sim 1.1)\sqrt{D^2 - d_n^2}$$

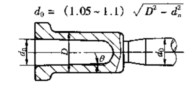


图 2.6-21 深孔锻件

d）在不增加聚集工步或增加工步数不多的前提下，应采取较小直径的坯料。

② 选择坯料直径 d_0

a）首先试取坯料直径 d_0 按截面积相等原则，求出计算直径 d_p

$$d_p = \sqrt{D^2 - d_n^2}\ （图 2.6-21）$$

式中，D 为锻件外径，mm；d_n 为锻件内孔直径，mm。

按锻件相对壁厚试取坯料直径：

ⅰ）薄壁锻件$\left(\frac{D-d_n}{d_n} \leqslant 0.6\right)$

若采用扩孔成形，试取坯料直径 $d_0 = (1.05 \sim 1.1)\ d_p$；若是薄壁高度小的环形锻件，采用扩径，试取 $d_0 < d_n$。

ⅱ）厚壁锻件$\left(\frac{D-d_n}{d_n} > 1.25\right)$

试取坯料直径 $d_0 > d_n$，采用卡细工步。

ⅲ）一般壁厚锻件$\left(\frac{D-d_n}{d_n} = 0.6 \sim 1.25\right)$

试取坯料直径 $d_0 = d_n \pm (1 \sim 2)$ mm。

b）最后选定坯料直径 根据试取的坯料直径 d_0，按选择坯料直径的原则进行复查，主要是检查镦粗比 φ 和卡细率 f，最后选定坯料直径。

（3）确定坯料长度

1）具有粗大部分的杆类锻件 坯料长度等于锻件杆长加上镦粗长度。

2）穿孔类锻件 坯料长度约以坯料重 20 kg 为限来确定，便于工人操作。

6.2 终锻工步设计

终锻工步按热锻件图设计，热锻件图的尺寸是在冷锻件图尺寸上加冷缩率 1.2%～1.5%，再按锻件形状（杆类、穿孔类）特征进行工步设计。

（1）具有粗大部分的杆类锻件

1）若是闭式模锻，则终锻工步形状就是热锻件图。

2）若是开式模锻，则终锻工步形状就是热锻件图再加横向飞边，如图 2.6-19a。

横向飞边的位置、形状和尺寸如图 2.6-4 和表 2.6-2 所示。

下列情况采用开式模锻。

① 锻件头部有一小直径台阶，需要在凸模内成形，如图 2.6-22 所示。

② 形状复杂，不易充满的锻件。

③ 采用后挡板或钳口挡板定位锻件，由于坯料公差和加热温度差异等因素引起体积变化。

（2）穿孔类锻件

终锻工步形状是热锻件图加连皮，即终锻工步获得带连皮的不通孔锻件，经过下一道穿孔工步后获得通孔锻件。

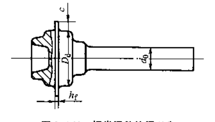


图 2.6-22 杆类锻件终锻工步

连皮设计一般有两种形式。

1）尖冲头冲孔，如图 2.6-23 所示，其尺寸按下列公式设计

$$l_0 = K_1 d_n$$

式中，l 为穿孔厚度，mm；K_1 为穿孔厚度系数，$K_1 = 0.2 \sim 0.5$；d_n 为锻件的内孔直径，mm。

$c = 0.5 l_0$；

$R_1 = 0.2 d_n$；

$R_2 = 0.4 d_n < 6$ mm；

$Q = 0°30'$；1°；1°30′。当 $\frac{H}{d_n} \leqslant 1.5$，取 0°30′。

冲头的顶端角度 α 常用 60°、90°、120°，对于多次冲孔的深孔锻件，前面工步采用小角度尖冲孔，便于驱散金属。

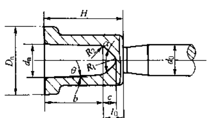


图 2.6-23 尖冲头冲孔

2）平冲头冲孔，如图 2.6-24 所示，其尺寸按下列公式设计：

$$l_0 = 2 \sim 10 \text{ mm}$$

$$R_1 = (0.8 \sim 1.8)\ d_n$$

$$R_2 = (0.1 \sim 0.15)\ d_n$$

$\frac{H}{d_n} \leqslant 1$ 的浅孔锻件常用平冲头冲孔，平冲头成形力较大，但连皮薄（l_0 小），穿孔力小，穿孔质量好，且穿孔冲头不易磨损，寿命长。

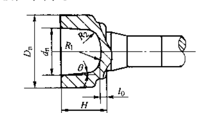


图 2.6-24 平冲头冲孔

6.3 预锻工步设计

预锻工步的形状直接影响终锻工步的成形。设计的一般原则是，为了保证充满终锻模膛，应使设计的预锻坯料在终锻模膛内尽可能是镦粗成形，即预锻工步图的高度相应要比终锻工步大 6～8 mm，而且直径比终锻工步小 0.5～2 mm。对于不同类型的锻件，有不同的设计特点。

（1）具有粗大部分的杆类锻件



对于不易充满的部位，应在预锻工步首先成形，例如图2.6-25b终锻工步的后端 R 不易充满，在预锻工步图2.6-25a先在凹模中成形圆角 R。

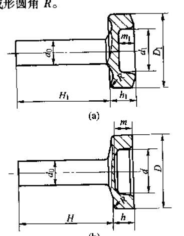


图2.6-25 预锻工步和终锻工步比较

$H_1=H$；

$h_1=h+(6\sim8)$ mm；

$m_1=m-(4\sim6)$ mm；

$d_1=d$；

$D_1=D-(0.5\sim2)$ mm。

(2) 冲孔类锻件

1) 冲孔次数和冲孔深度分配

① 冲孔次数。决定于冲孔深度 h 如图2.6-26所示和冲孔直径 d_n 的比值，见表2.6-10。

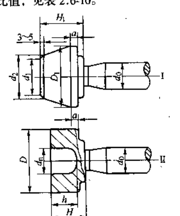


图2.6-26 浅孔厚壁锻件

表2.6-10 冲孔次数

h/d_n	≤1.5	1.5~3	3~5
冲孔次数	1	2	3

② 冲孔深度分配。多次冲孔时，第一次冲孔深度较浅，因为第一次冲孔坯料尚未稳定，其他各次冲孔深度基本相等，其计算公式如下：

第一次冲孔深度 $h_1=0.5d_n$；

其余冲孔深度 $h_k=(1\sim1.5)\ d_n$。

2) 冲孔预锻工步设计要点。根据锻件相对壁厚和相对孔深分为四种。

① 浅孔厚壁锻件$\left(\frac{H}{d_n}\leqslant1.5,\ \frac{D-d_n}{d_n}>1.25\right)$。这类锻件不需要预冲孔，只在终锻时一次冲孔，其预锻工步设计原则如下（参见图2.6-26）。

a) $D_1=D$ 或 $D_1=D-(1\sim2)$ mm；$a=5\sim20$ mm。

后端一段（a 段）直径等于终锻直径或稍小些，因为厚壁锻件后端不易充满，这样就保证锻件后端易充满且定位良好。

b) $H_1=H+(8\sim15)$ mm

预锻高度 H_1 应比终锻高度 H 高8~15 mm，保证冲孔时有一定压缩量，避免金属倒流。

c) $d_1=d_n+(8\sim10)$ mm

前端要设计成锥形，其直径 d_1 要大于冲孔直径 d_n，这样避免冲孔时金属拉缩产生折纹。

d) d_2 按体积不变原则计算确定，模膛充不满系数 $K=1.1\sim1.2$。

② 浅孔薄壁锻件 $(\frac{H}{d_n}\leqslant1.5,\ \frac{D-d_n}{d_n}\leqslant0.6)$。这类锻件孔大、冲头粗，坯料易被镦粗，锻件前端不易充满，为此，把预锻前端直径设计成和终锻外径相同或稍小，如图2.6-27所示。

a) $D_1=D$ 或 $D_1=D-(1\sim2)$ mm；$a=5\sim20$ mm。

b) $H_1=H+(8\sim15)$ mm。

c) $d_1=d_n+(8\sim10)$ mm。

d) d_2 按体积不变原则计算确定，模膛充不满系数 $K=1.1\sim1.2$，为了保证预锻的几何形状，有时预冲孔，如图2.6-27虚线部分所示，以保证 $H_1=H+(8\sim15)$ mm。

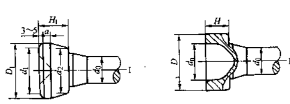


图2.6-27 浅孔薄壁锻件

③ 深孔薄壁锻件 $(\frac{H}{d_n}>1.5,\ \frac{D-d_n}{d_n}\leqslant0.6)$。除遵循浅孔薄壁锻件预锻工步设计计算外，还需满足如下要求如图2.6-28所示。

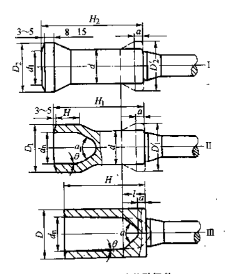


图2.6-28 深孔薄壁锻件

a) $d_p=(1.05\sim1.1)\sqrt{D^2-d_n^2}$

随着壁厚的增大，系数取大值。为避免金属变形时倒

流，减少模具磨损，采用扩孔镦粗成形。

b) $\alpha_1 < \alpha$。冲孔冲头顶端的角度应使下一道的角度比上一道角度大，否则，金属变形时易在内孔产生折纹。一般可按角度 α 为 60°、75°、90°、110°、120°顺序采用，每道工步的冲头斜度 θ 应保持不变。

c) 薄壁锻件，后端一般均能充满，但当相对壁厚 $\frac{D-d_n}{d_n}$ 接近 0.6 时，不易充满，此时可采用两种措施，如图 2.6-28 虚线部分所示：在预锻工步的后端设计一段法兰，$D'_1 = D -$ (0 ~ 2) mm，$a = 5 \sim 20$ mm；或终锻工步冲孔冲头深入坯料。

④ 深孔厚壁锻件（$\frac{H}{d_n} > 1.5$，$\frac{D-d_n}{d_n} > 1.25$）。除遵循浅孔厚壁和深孔薄壁锻件预锻设计计算外如图 2.6-29 所示。

$d_p = (1.1 \sim 1.3)\sqrt{D^2 - d_n^2}$

$H_1 = H + 5 \sim 10$ mm

$h_1 = (1 \sim 1.5)\ d_n$

$D_2 = D_1$

$H_2 = H_1 + (8 \sim 15)$ mm

d_k 由体积不变原则计算确定。

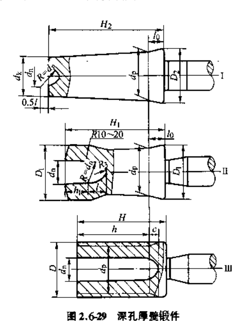


图 2.6-29 深孔厚壁锻件

6.4 聚集工步设计

聚集工步设计的依据是镦粗（聚集）规则

(1) 聚集工步的体积 V_K

$$V_K = V_A K (1+\delta)(1+S)^3$$

式中，V_A 为终锻工步的体积；K 为充不满系数；δ 为烧损率，其中火焰加热 3%，电加热 1% ~ 1.5%；S 为热锻件冷缩率，一般取 1.2% ~ 1.5%。

1) 充不满系数的作用

① 防止在聚集坯料时产生横向飞边，适当地加大锥形模膛的体积。

② 当终锻模膛磨损后，保证有足够的聚集坯料。

2) 充不满系数的数值

第一工步，$K_1 = 1.04 \sim 1.1$，常用 $K_1 = 1.06 \sim 1.08$；

第二工步，$K_2 = 1.04 \sim 1.08$，常用 1.06；

第三工步，$K_3 = 1.03 \sim 1.04$；

第四工步，$K_4 = 1.03 \sim 1.04$。

预锻工步一般取 $K = 1.06 \sim 1.08$，但必须保证在终锻时有 8 ~ 15 mm 的压缩量，为此有时取 1.2。

(2) 设计聚集工步的原则

1) 当 $\varphi > 4.5$，在锥形小端部分设计一段长度 5 ~ 30 mm 的圆柱，镦粗比 φ 越大，取大值，其目的是在凸模内装塞子，便于调整聚集坯料的体积，如图 2.6-30a 所示。

2) 当 $\varphi > 7$，在压缩系数 β 值允许的前提下，为了增加聚集压缩量，可以在锥形大端部分设计一个较大的锥体，如图 2.6-30b 所示。

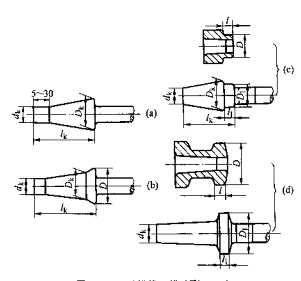


图 2.6-30 凸模锥形模膛聚集形式

3) 当锻件有台阶 D 时，如图 2.6-30c 所示，且直径 D 小于允许的大端直径 $D_k = \varepsilon_k d_0$，即 $D \leq \varepsilon_k d_0$，在压缩系数 β 允许范围内，必须在第一次聚集时予以成形，否则终锻时为挤压成形。同时也便于在下一工步定位。$D_1 = D -$ (0 ~ 1) mm，$l_1 = l$。

4) 具有后法兰的锻件，例如汽车倒车齿轮，在第一道聚集时就要把法兰锻出。否则后续工步难以成形，而且后法兰部分的坯料镦粗比 φ 不能超过自由聚集允许镦粗比 φ_g。

6.5 管料的聚集工步设计

(1) 设计原则

依据前叙的管料镦粗（聚集）规则。

1) 对于薄壁管

① 开始宜采用外径不变，仅缩小内径加厚管壁，如图 2.6-16b 所示。

② 然后同时扩大内外径加厚管壁，如图 2.6-16d 所示。设计时，假设扩大的内径不变，仅扩大外径，按表 2.6-9 确定管料镦粗方式系数 μ。

③ 尽可能采用横向飞边，确保制坯体积稳定，这是由于管坯料的厚度公差很大，否则锻件易产生折纹和厚度超差。

2) 对于厚壁管　由于坯料的稳定性较好，可采用在凸模锥形模膛聚集坯料，如图 2.6-16e 所示，避免凹模聚集可能产生的纵向毛刺。

(2) 聚集工步设计

1) 第一工步设计。根据锻件图和镦粗方式先计算出锻件镦粗比 m 和自由聚集允许镦粗比 m_g，由图 2.6-18 得允许的坯料计算直径增大系数 ε_1，计算出第一工步允许增大计算直径 d_{1p}：

$$d_{1p} = \varepsilon_1 d_{0p}$$

内圈镦粗方式，例如指定第一工步的外径 D_1 或内径 d_1 保持不变，即仍为管坯料的 D_0 或 d_0，由第一工步的计算直径 d_{1p} 可计算出其允许的最大直径（$d_{1p}^2 = D_0^2 - d_1^2$ 或 $d_{1p}^2 = D_1^2 - d_0^2$）。

第一工步镦粗后的长度 l_1 由体积不变原则确定。

$$l_1 = \frac{V_A(1+\delta)K}{\frac{\pi}{4}(D_1^2 - d_1^2)}$$

2）第二工步设计。第二工步计算，把第一工步的外径 D_1 和内径 d_1 作为镦粗坯料，当镦粗方式确定后，即可求出自由聚集允许镦粗比 m_g，和第一工步镦粗比 m_1，并由图2.6-18得第一工步坯料计算直径允许增大系数 ε_2，算出第二工步的允许增大计算直径 d_{2p}（$d_{2p} = \varepsilon_2 d_{1p}$）。

由此计算出第二工步的 D_2 或 d_2 及 l_2。以此类推，若需第三次聚集，计算方法同上，直至聚集坯料的镦粗比 m_n 小于该坯料的自由聚集允许镦粗比 m_g，方可终锻成形。

（3）管料镦粗（聚集）举例——汽车半轴套管锻件的聚集

1）工艺方案分析。图2.6-31所示零件是薄壁管锻件，管料壁厚公差很大（12^{+3}_{0}），对于一定下料长度的坯料，其镦粗的体积相差悬殊，法兰厚度易超差，内孔易产生折纹。因此，第一工步宜外径保持不变，仅缩小内孔聚集坯料，第二工步同时扩大内外径，并产生横向飞边，保证终锻体积一定如图2.6-32所示，第三工步切除横向飞边，然后验算是否需要继续聚集坯料。最后终锻成形。

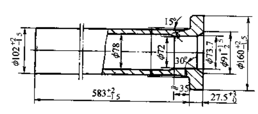


图2.6-31 半轴套管锻件图

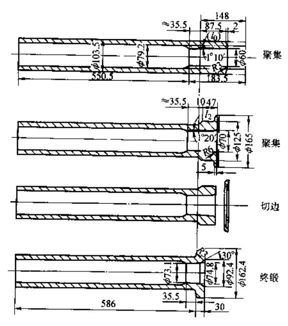


图2.6-32 半轴套管工步图

2）计算锻件镦锻变形部分的体积 V_D、镦粗长度 l_B 和镦粗比 m

① 锻件镦锻变形部分的体积 V_D

a）锻件法兰体积 $V_F = 478\,532\ \text{mm}^3$

b）坯料镦锻至杆部35 mm处的增量体积 $V_{35} = 13\,907\ \text{mm}^3$

c）飞边体积 $V_f = \frac{\pi}{4}(165^2 - 124^2) \times 5\ \text{mm} = 46\,507\ \text{mm}^3$

所以 $V_D = V_F + V_{35} + V_f = 478\,532\ \text{mm} + 13\,907\ \text{mm} + 46\,507\ \text{mm}$

$= 538\,946\ \text{mm}^3$

② 镦粗长度 l_B

$$l_B = \frac{V_D(1+\delta)}{\frac{\pi}{4}(D_0^2 - d_0^2)} = \frac{538\,946(1+1.5\%)}{\frac{\pi}{4}(102^2 - 75^2)}\ \text{mm} = 146\ \text{mm}$$

③ 镦粗比 m

a）管料的计算直径 $d_{0p} = \sqrt{102^2 - 78^2}\ \text{mm} = 65.73\ \text{mm}$

b）镦粗比 $m = \frac{146}{65.73} = 2.2$

3）设计镦粗（聚集）工步　将所有尺寸都转化为热尺寸，取冷收缩率1.5%；$D_0 = 103.5\ \text{mm}$；$d_0 = 79.2\ \text{mm}$；$d_{0p} = 66.7\ \text{mm}$；$V_D = 563\,564\ \text{mm}^3$；$l_B = 148\ \text{mm}$。

① 第一工步设计　外径不变，仅缩小内径。

a）镦粗长度 l_B'、镦粗体积 V_D' 和镦粗比 m'

$l_B' = 148 + 35.5 = 183.5\ \text{mm}$

$$V_D' = V_D + \frac{\pi}{4}(D_0^2 - d_0^2) \times 35.5$$

$$= 563\,564\ \text{mm}^3 + \frac{\pi}{4}(103.5^2 - 76.1^2) \times 35.5\ \text{mm}^3$$

$$= 700\,701\ \text{mm}^3$$

$$m_0' = \frac{l_B'}{d_{0p}} = \frac{183.5}{66.7} = 2.75$$

b）自由聚集（镦粗）的允许镦粗比 m_{0g}

$$\frac{D_0}{d_0} = \frac{103.5}{79.2} = 1.31$$

查表2.6-9得镦粗方式系数 $\mu = 3.4$。

$$m_{0g} = \frac{\mu(D_0 - d_0)}{2d_{0p}} = \frac{3.4(103.5 - 79.2)}{2 \times 66.7} = 0.62$$

c）允许缩小的最小内径 d_{1min}　由 $m'_0 = 2.75$，$m_{0g} = 0.62$，查图2.6-18，得第一工步 $\varepsilon_1 = 1.29$，计算得 $d_{1p} = \varepsilon d_{0p} = 1.29 \times 66.7 = 86\ \text{mm}$，由公式 $d_{1p}^2 = D_1^2 - d_1^2$ 得

$$d_{1min} = \sqrt{103.5^2 - 86^2}\ \text{mm} = 57.6\ \text{mm}$$

d）选择缩小内径 d_1　为了镦粗稳妥可靠，取 $d_1 = 60\ \text{mm}$，第一工步的实际计算直径 $d_{1p}' = \sqrt{103.5^2 - 60^2}\ \text{mm} = 84.33\ \text{mm}$

e）计算镦粗后的管坯长度 l_1

$$l_1 = \frac{700\,701 \times 1.02 \times 1.05}{\frac{\pi}{4}(103.5^2 - 60^2)}\ \text{mm} = 130\ \text{mm}$$

考虑凸模有1°10′的模锻斜度，如图2.6-32第一工步所示，计算得 $l_1 = 123\ \text{mm}$，从法兰算起的管坯长度 $l = 123 - 35.5 = 87.5\ \text{mm}$。

② 第二工步设计　同时扩大内外径，并产生横向飞边。为使终锻时，内径基本保持不变，取第二工步内径 $d_2 = 70\ \text{mm}$。



a）自由镦粗的允许镦粗比 m_{1g}

$$\frac{D_1}{d_1}=\frac{103.5}{60}=1.73$$

查表 2.6-9 得镦粗方式系数 $\mu=2.1$

$$m_{1g}=\frac{2.1\times(103.5-60)}{2\times84.33}=0.54$$

b）允许扩大的最大外径 D_{2max}

$$m_1=\frac{l_1}{d_{1p}}=\frac{87.5}{84.33}=1.04$$

$m_1>m_{1g}$　故需要再聚集坯料

查图 2.6-18 得第二工步 $\varepsilon_2=1.37$，允许的最大计算直径 $d_{2p}=1.37\times84.33$ mm $=115.5$ mm

$$D_{2max}=\sqrt{d_{2p}^2+d_2^2}=\sqrt{115.5^2+70^2}\ \text{mm}=135\ \text{mm}$$

c）选择扩大的外径 D_2　为了镦粗稳妥可靠，取 $D_2=125$ mm。

第二工步的实际计算直径 $d_{2p}'=\sqrt{125^2-70^2}$ mm $=103.56$ mm

d）计算镦粗后管坯长度 l_2　计算得 $l_2=47$ mm，飞边外径取 $\phi165$ mm，厚度为 5 mm，为了存放多余金属，设计了飞边仓部。

e）第二工步坯料的自由镦粗的允许镦粗比 m_{2g}

$$m_{2g}=\frac{\mu(D_2-d_2)}{2d_{2p}}=\frac{2.1\times(125-70)}{2\times103.56}=0.56$$

f）第二工步坯料的镦粗比 m_2

$$m_2=\frac{l_2}{d_{2p}}=\frac{57}{103.56}=0.55$$

$m_2<m_{2g}$　即第二工步坯料镦粗比小于自由镦粗允许镦粗比，第二工步坯料切边后，可直接终锻成形。

7　平锻模结构

7.1　模具的总体结构

水平分模平锻机的模具结构如图 2.6-33 所示，垂直分模平锻机的模具结构如图 2.6-34 所示。

平锻模一般由凸模夹持器、凸模（或凸模柄和凸模）、凹模（或凹模体和凹模镶块）和前后挡板四部分组成。在水平分模平锻机的凹模体上还需配置冷却模具和吹扫氧化皮的喷嘴。

凸模夹持器安装在主滑块的凹座中，在凸模夹持器上安装若干个工步的凸模。

凹模由上、下（左、右）两块组成，下凹模（右凹模）安装在床身上，工作时不运动，故又称固定凹模，上凹模（左凹模）安装在平锻机的夹紧滑块上，随夹紧滑块上下（左右）运动，故又称活动凹模。

挡板分为前挡板和后挡板，主要用来控制变形金属的长度。前挡板一般是在一根棒料上锻若干个锻件时使用。后挡板主要用来控制具有粗大部分的杆类锻件杆部长度。一般是一根棒料锻一个锻件。水平分模平锻机采用机械手操作时，无需前挡板或后挡板，靠机械手本身来定位。

7.2　凸模夹持器的设计

依据平锻机技术规格和安模空间主要参数，见表 2.6-6 和表 2.6-7，图 2.6-9 和图 2.6-10。由主滑块的安模空间尺寸（长、宽、高）、锻件的模锻工步数和设备所能生产的最大锻件直径 D_{max} 进行设计。

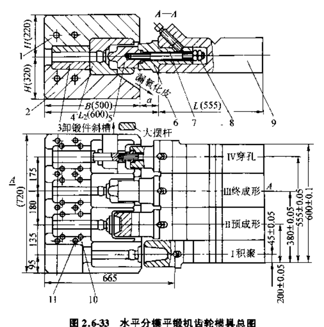


图 2.6-33　水平分模平锻机齿轮模具总图
1—活动凹模体；2—固定凹模体；3—夹紧镶块；4—终成形镶块；5—终成形冲头；6—凸模柄；7—双头螺柱；8—螺母；9—凸模夹持器；10—镶块螺钉；11—喷嘴

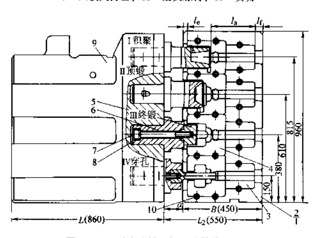


图 2.6-34　垂直分模平锻机齿轮模具总图
1—活动凹模体；2—固定凹模体；3—夹紧镶块；4—终锻镶块；5—终锻凸模；6—凸模柄；7—内六角螺钉；8—弹簧垫圈；9—凸模夹持器；10—内六角螺钉（紧固凹模镶块）

（1）水平分模平锻机凸模夹持器（图 2.6-35）

1）夹持器的宽度 C_a 和 C_b

$$C_a=D_{max}+2(0.1D_{max}+10)$$

式中，C_a 为夹持器安装凸模部分的宽度。决定于模锻工步数量和凹模模膛布置，应与凹模相对应，mm；D_{max} 为设备所能生产最大锻件的直径，如果是专用夹持器，就取实际锻件的最大直径，mm；C_b 为凸模夹持器在主滑块内部分宽度，mm。

2）夹持器的长度 L 见图 2.6-35 和图 2.6-33。

$$L=l_p-B-a$$

式中，l_p 为平锻机的安模封闭长度，mm，查图 2.6-9 和表 2.6-6；B 为凹模体的长度，mm；a 为在模具封闭状态下，凸模夹持器与凹模之间应保持的间距，通常采用的间距值见表 2.6-11。





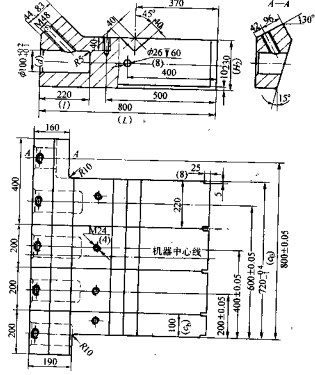


图 2.6-35　12.5 MN水平分模平锻机凸模夹持器

3）夹持器的高度 H_2，即平锻机主滑块的安模空间高度，查表 2.6-6 和图 2.6-9。

4）其他尺寸

① 安装凸模的孔径 d 和长度 l。孔径 d 主要考虑凸模和夹持器接触面单位面积的压力，其值小于夹持器材料的屈服强度。

$$孔长\ l=(1.6\sim2.2)\ d$$

式中，d 为安装凸模的孔径，mm。

② 顶紧螺钉要有足够的强度和刚性，防止使用中变形，其公称直径如表 2.6-12 所示。

表 2.6-11　凸模夹持器和凹模之间间距　mm

平锻机规格/MN	间距值 a
2.25~3.15	>30
5~6.3	>35
8~9	>45
12.5	>60
16	>70

表 2.6-12　凸模夹持器顶紧螺钉直径　mm

平锻机规格/MN	顶紧螺钉公称直径
2.25~3.15	M30×2
4.5~6.3	M36×3
8~9	M42×3
12.5	M48×3
16	M64×4

5）举例。试设计 12.5 MN 水平分模平锻机凸模夹持器，如图 2.6-35 所示。按五个工步——聚集、第二次聚集，预锻、终锻、穿孔（或切边）设计。

① $C_a=D_{max}+2\ (0.1D_{max}+10)$
$=150\ \text{mm}+2\ (0.1\times150+10)\ \text{mm}$
$=200\ \text{mm}$

② $C_b=100$、200、200、220 mm 四块组成，由模膛中心线划分（考虑终锻时的锻造中心）。

③ 长度 $l=l_p-B-a=(1\ 500-560-140)\ \text{mm}$
$=800\ \text{mm}$

式中，l_p 为 12.5 MN 平锻机安模封闭长度 1 500 mm；B 为凹模体长度 560 mm，由设计确定；a 为凸模夹持器和凹模的间隔，考虑到安装括飞板，取大值，$a=140$ mm。

④ 高度 $H_2=230$ mm，查表 2.6-6 和图 2.6-9。

⑤ 安装凸模柄孔 $\phi100\ \text{mm}\times220\ \text{mm}$，顶紧螺钉 M48×3。

（2）垂直分模平锻机凸模夹持器

设计同（1），见图 2.6-36。

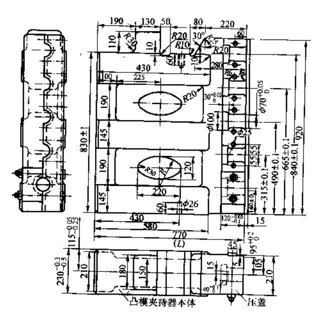


图 2.6-36　12.5 MN垂直分模平锻机凸模夹持器

7.3　凹模体

（1）设计原则

在平锻机安模空间尺寸和凹模体最大容许尺寸范围内，模膛各部分（聚集、成形、穿孔、切边等）应该做在各个镶块上，也即凹模采用全镶块型式，如图 2.6-37 和图 2.6-38 所示。

凹模采用全镶块的优点如下。

1）凹模体可以采用一般钢，如 45、40Cr，镶块采用锻模钢，可节省昂贵的模具钢。

2）对于同一种平锻机，可以把凹模体设计成通用标准件，不仅可以简化模具设计工作，而且可以节省大量模具制造和翻新工时。

（2）凹模主要尺寸设计

1）凹模体宽度 C（即垂直分模平锻机凹模体高度）是凹模体上工作镶块窝座直径（即工作镶块外径 D_S）和宽度方向两端的容许壁厚（T）之和，必须在平锻机安模空间规格内。

$$C=nD_S+2T$$

式中，n 为工步数；D_S 为工作镶块外径，mm；T 为两端允许壁厚，$T=30\sim40$ mm。

2）凹模体的长度 B（见图 2.6-33）

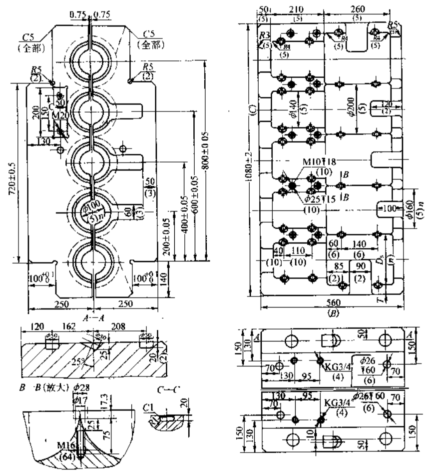


图 2.6-37　12.5 MN 水平分模平锻机凹模体

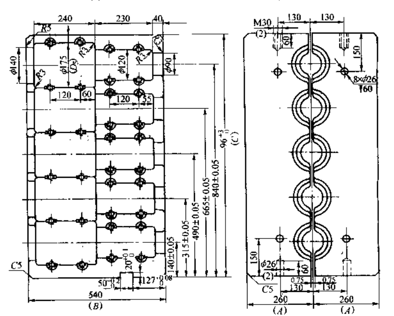


图 2.6-38　12.5 MN 垂直分模平锻机凹模体

$$B = l_a + l_b + l_c + l_d + l_e + l_f$$

式中，l_a 为棒料的夹紧长度，mm；l_b 为凹模模膛内的坯料长度或锻件高度，若坯料在凸模内成形，则 $l_b = 0$ mm；l_c 为某工步的最大压缩量，mm，若是第一工步，则 $l_c = l_B - l_1$（l_B 为镦粗长度，l_1 为第一工步聚集锥体长度）；l_d 为凸模在凹模内的导程，mm，一般取 $l_d = 20 \sim 40$ mm；l_e 为凹模体长度方向镶块窝座前部的壁厚，一般 $l_e = 20 \sim 40$ mm；l_f 为凹模体长度方向镶块窝座后部的壁厚，一般 $l_f = 30 \sim 60$ mm。

3）凹模体的厚度 A　按锻件采用的平锻机安模空间参数确定，查表 2.6-6 和表 2.6-7。

4）其他尺寸

① 夹紧镶块窝座直径一般取坯料直径 2～3 倍，长度取 2.5～4 倍的坯料直径。

② 安装水平分模平锻机凹模体的螺孔位置和尺寸，查表 2.6-6 和表 2.6-7。

③ 紧固凹模镶块的内六角螺钉螺孔尺寸查表 2.6-13。

④ 水平分模平锻机凹模体上冷却水和压缩空气通道一般取 ϕ20 mm，但 12.5 MN 和大于 12.5 MN 平锻机采用两条通道，喷嘴螺纹采用 M10×1。

表 2.6-13 紧固凹模镶块的螺孔直径

平锻机规格/MN	2.25～6.30	8.00～12.5	12.5～16
螺孔直径/mm	M12	M16	M20

8 平锻模膛和凸模、凹模锻块

8.1 终锻凹模和凸模

如图 2.6-39 所示。

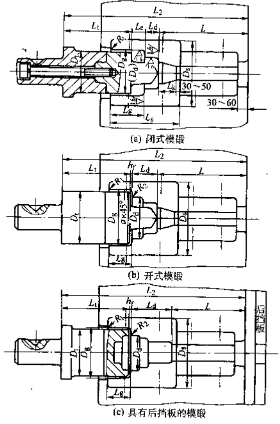


图 2.6-39 终锻的模膛、凹模和凸模

(1) 凹模镶块设计

1) 成形模膛的几何形状和尺寸按终锻工步的形状和尺寸设计。

2) 确定凹模模膛的凸模导程尺寸。分为闭式模锻和开式模锻。

① 凹模的导程直径 D_g

a) 闭式模锻，如图 2.6-39a 所示。

$$D_g = D_d$$

式中，D_d 为热锻件（终锻工步）的最大外径。

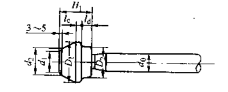
b) 开式模锻，如图 2.6-39b 所示。

$D_g = D_d +$ (2～2.5) C（用于前挡板定位）

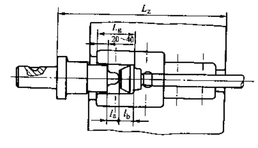
$D_g = D_d +$ (2.5～3) C（用于后挡板定位）

式中，C 为横向飞边宽度，查表 2.6-2。

② 凹模的导程长度 L_g 如图 2.6-40 所示



(a) 预锻工序图



(b) 终锻的凸模和凹模

图 2.6-40 终锻时凸模碰到预锻坯料的状态

导程在凸模镦锻行程起导向定位作用，提高锻件精度。一般当凸模碰到坯料时，凸模应该已进入凹模模膛 20～40 mm，如图 2.6-40 所示。

$$L_g = l_a + l_b + (20 \sim 40)\ \text{mm}$$

式中，l_a 为凸模冲孔冲头长度，由终锻工步设计确定；l_b 为预锻坯料最大直径部分的高度，见图 2.6-40，$l_b = H_1 - l_d$。

③ 凹模镶块外形尺寸

a) 镶块外径 $D_s = D_g + 2M$

式中，M 为镶块最小壁厚，$M \geq 0.1D_g + 10$ mm。

b) 镶块长度 $L_s = L_g + l_d + l_k +$ (30～50) mm

式中，L_g 为凹模的导程长度，mm；l_d 为凹模的非导程成形模膛高度，mm；l_k 为坯料夹细或扩径长度（查夹细或扩径模膛设计），mm。

以上计算的镶块外径和长度最后在模具总体布置时再修正。

(2) 凸模设计

1) 凸模直径 D_t

$$D_t = D_g - 2\delta$$

式中，δ 为凸凹模的单边径向间隙，查表 2.6-14。

表 2.6-14 凸模和凹模的单边径向间隙 δ mm

平锻机规格/MN	2.25～6.3	8.0～12.5	16.0～20.0
径向间隙 δ/mm	0.3～0.4	0.4～0.5	0.5～0.6

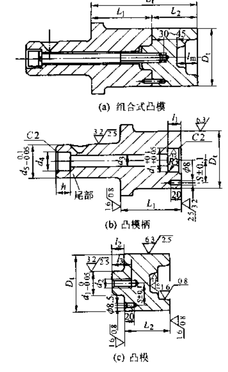
2) 凸模长度 l_t

$$l_t = L_2 - [l_d + (h_f \text{ 或 } l_e) + L]$$

式中，L_2 为凸模和凹模体封闭尺寸，mm，由模具的总体设计决定；l_d 为凹模的非导程成形模膛高度，mm；l_e 为凹模的导程成形模膛高度，mm；h_f 为横向飞边厚度，mm，查表 2.6-2；L 为凹模上其他模膛（如卡细或扩径，夹紧模膛等）的长度，mm。

(3) 凸模柄

终锻凸模受力大，易磨损，为了节省模具钢，一般把凸模分成凸模和凸模柄，构成组合式凸模，其结构型式有多种，图 2.6-41 为某厂的组合式凸模。



(a) 组合式凸模

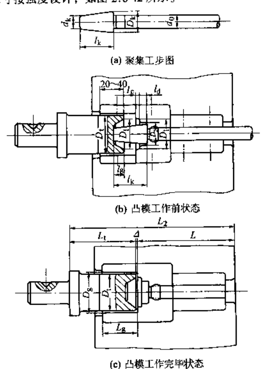
(b) 凸模柄

(c) 凸模

图 2.6-41 组合式凸模

8.2 预锻凸模和凹模

凸凹模的模膛部分的形状和尺寸按预锻工步图设计，外形尺寸按强度设计，如图 2.6-42 所示。



(a) 聚集工步图

(b) 凸模工作前状态

(c) 凸模工作完毕状态

图 2.6-42 预锻的凸模和凹模

(1) 凸模设计

1) 凸模外径 D_t

$$D_t = D_1 + 0.2\ (D_1 + l_e)\ + 20\ \text{mm}$$

式中，D_1 为模膛最大外径，由预锻工步图 2.6-40 决定，mm；l_e 为模膛深度，见图 2.6-42，由预锻工步图 2.6-40 决定，mm。

2) 凸模总长度 L_t

$$L_t = L_2 - (L + \Delta)$$

式中，L_2 为平锻模设计的封闭长度，等于设备的封闭长度减去夹持器长度，mm；L 为等于夹紧模膛长度和其他尺寸之和，mm；Δ 为凸模与凹模的顶面间隙，一般取 2～4 mm，查表 2.6-15。

表 2.6-15 凸模和凹模的顶面间隙 mm

平锻机规格/MN		2.25～6.3	8～16
顶面间隙/mm	第一次聚集	5	7
	第二工步	4	5
	第三工步	2	3

3) 其他尺寸同终锻的凸模设计。

(2) 凹模设计

1) 凹模导程直径 D_g

$$D_g = D_t + 2\delta$$

式中，δ 为凸模与凹模的径向单边间隙，一般取 0.4～0.6 mm。

2) 凹模导程长度 l_g

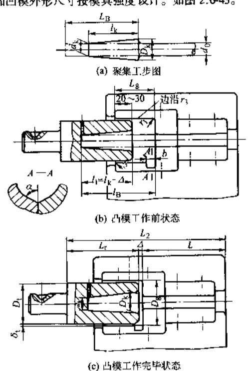
$$l_g = l_k - l_c - l_d - l_e + (20～40)\ \text{mm}$$

式中，l_k 为聚集坯料的长度，mm；l_c、l_d、l_e 为凸、凹模的模膛长度，mm。

3) 凹模镶块的外形尺寸同终锻凹模。

8.3 聚集凸模和凹模

模膛内部形状和尺寸按聚集即锥体尺寸 d_k、D_k、l_k 等，凸模和凹模外形尺寸按模具强度设计。如图 2.6-43。



(a) 聚集工步图

(b) 凸模工作前状态

(c) 凸模工作完毕状态

图 2.6-43 聚集的凸模和凹模

(1) 凸模设计

凸模直径 $D_t = D_k + 0.2\ (D_k + l_1)\ + 5\ \text{mm}$

式中，D_k 为聚集模脖的大端直径，mm；l_1 为聚集模膛的长度，mm，$l_1 = l_k - \Delta$。

凸模的其他尺寸见终锻凸模设计。

(2) 凹模设计

1) 凹模模膛直径 D_g

$$D_g = D_1 + 2\delta$$

式中，δ 为凸模和凹模的径向间隙，见表2.6-16。

表2.6-16　凸模和凹模的径向间隙

平锻机规格/MN		2.25~6.3	8~16
径向间隙 δ/mm	第一次聚集	0.6	0.7
	第二工步	0.5	0.6
	第三工步	0.4~0.5	0.5~0.6

2) 凹模模膛长度 l_g（包括凸模导程长度，一般取20~30 mm）

$$l_g = (l_B - l_1) + (20 \sim 30)\ \text{mm}$$

需注意的是，对于垂直分模平锻机和前挡板往床身内摆动的水平分模平锻机，若用前挡板定位，要使坯料伸出凹模外的长度大于15 mm。

3) 氧化皮槽尺寸，如图2.6-43所示。

① 垂直分模平锻机　$b = 20 \sim 30$ mm，$\alpha = 30° \sim 60°$。

② 水平分模平锻机　$b = 30 \sim 50$ mm，开在模膛靠模体的侧面。

4) 凹模圆角半径，如表2.6-17和图2.6-43所示。

表2.6-17　凹模圆角半径　mm

D_g	r_1	r_2	r_3
<20	2	2	1
21~80	3	3	2
81~160	5	5	3
161~260	5	5	3
261~360	6	5	5

5) 凹模镶块的外形尺寸见终锻凹模尺寸。

8.4　夹紧模膛设计

1) 夹紧模膛长度 L 见表2.6-18和图2.6-44。

表2.6-18　夹紧模膛长度　mm

d_o 棒料直径	10~19	20~29	30~39	40~49	50~59	60~69	70~79	80~89	90~100
夹紧长度 L	120	140	170	200	230	250	280	310	340
r_1	1	1.5	1.5	2	2.5	3	3	3.5	3.5
r_2	3	3	3	4	5	6	6	8	8

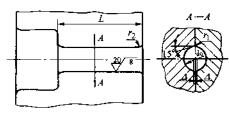


图2.6-44　夹紧模膛

2) 夹紧模膛偏心。偏心必须满足棒料在下偏差时也能夹紧，对于具有粗大部分的杆类锻件，还应满足棒料在夹紧变形后的直径要大于锻件杆径下偏差。

$$\frac{b}{2} > \Delta > \frac{a}{2}$$

式中，Δ 为夹紧模膛的偏心，mm；a 为棒料下偏差，mm；b 为锻件杆径下偏差，mm。

3) 夹紧模膛模锻斜度。模锻斜度一般取15°，便于出模和存放棒料偏心夹紧和棒料公差引起的多余金属。

8.5　卡细模膛设计

见图2.6-45。

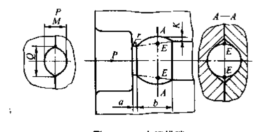


图2.6-45　卡细模膛

(1) 卡细模膛的作用及其适用范围

作用是将棒料的直径变细，主要用于两种情况。

1) 穿孔类锻件的棒料直径 d_0 比锻件穿孔直径 d_n 大，需使用卡细模膛。

2) 需要切断的具有粗大部分的杆类锻件，需采用卡细模膛。

(2) 卡细次数的确定

卡细次数决定于棒料直径和棒料卡细后直径的比值$\frac{d_0}{d_c}$，如表2.6-19。

表2.6-19　卡细次数

d_0/d_c	<1.45	1.45~2.5	>2.5
卡细次数	2	3	4

卡细直径　$d_c = d_n - (0.5 \sim 2)$ mm

式中，d_n 为锻件穿孔直径，mm。

(3) 卡细模膛尺寸的确定

1) 卡细模膛的短轴（M）和长轴（Q）见表2.6-20。

每次卡细量　$m = \dfrac{d_0 - d_c}{n - 1}$

式中，n 为卡细次数。

2) 卡细模膛刃口宽度 a 和贮料槽宽度 b 见表2.6-21。

3) 贮料槽尺寸 k 见表2.6-22。该处存放卡细时延伸和展宽的金属，终锻的卡细模膛也可使 $k = 0$。

8.6　扩径模膛设计

扩径模膛见图2.6-46。

(1) 适用范围

当穿孔类锻件所采用的棒料直径 d_0 比锻件穿孔直径 d_n 小时，需采用扩径模膛。

(2) 模膛尺寸

1) 颈部直径 $d = d_n - (1 \sim 2)$ mm

2) 颈部宽度 a 见表2.6-23。

3) 扩径模膛宽度 $b = 0.5d_0$（取整数，如15，20，25 mm……）。

表 2.6-20　卡细模膛的短轴和长轴　mm

卡细次数 n / 第 k 次	2	3	4
第一次	$M_1=d_c$ $Q_1=d_0+(0.5\sim2)$	$M_1=d_0-\frac{d_0-d_c}{2}$ $Q=d_0+(0.5\sim2)$	$M_1=d_0-\frac{d_0-d_c}{3}$ $Q_1=d_0+(0.5\sim2)$
第二次	$M_2=d_c$ $Q_2=M_2=d_c$	$M_2=d_c$ $Q_2=M_1+(0.5\sim2)$	$M_2=d_0-2\left(\frac{d_0-d_c}{3}\right)$ $Q_2=M_1+(0.5\sim2)$
第三次		$M_3=Q_3=d_c$	$M_3=d_c$ $Q_3=M_c+(0.5\sim2)$
第四次			$M_4=Q_4=d_c$

表 2.6-21　卡细模膛宽度　mm

棒料直径 d_o	<40	40~60	61~100
a	5	6	8
b	20	25~30	35~45
r	1	1.5	2

表 2.6-22　卡细贮料槽尺寸 K　mm

Q/M	1~1.13	1.13~1.15	>1.15
K	3.5	3.5~4.5	5~7

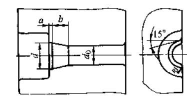


图 2.6-46　扩径模膛

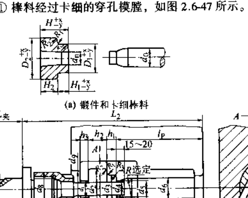
表 2.6-23　颈部宽度　mm

棒料直径 d_o	<30	31~49	50~69	70~95
a	5	6	7	8

8.7　穿孔凹模和凸模

穿孔模膛一般有两种型式：

① 棒料经过卡细的穿孔模膛，如图 2.6-47 所示。

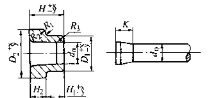


(a) 锻件和卡细棒料

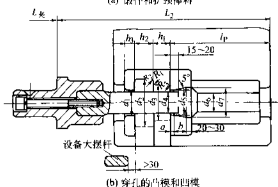
(b) 穿孔的凸模和凹模

图 2.6-47　棒料经过卡细的穿孔凸模和凹模

② 棒料经过扩径的穿孔模膛，如图 2.6-48 所示。



(a) 锻件和扩颈棒料



(b) 穿孔的凸模和凹模

图 2.6-48　棒料经过扩径的穿孔凸模和凹模

1) 穿孔凹模模膛尺寸，见图 2.6-47 和图 2.6-48。

$$d_1=1.01d_n+0.5\quad 或\quad d_1=d_n+2\delta$$

式中，δ 为凸模和凹模导向间隙，mm，查表 2.6-24。

表 2.6-24　凸模和凹槽导向间隙　mm

d_n	20~40	41~60	61~80	81~100
δ	0.3	0.4	0.5	0.6

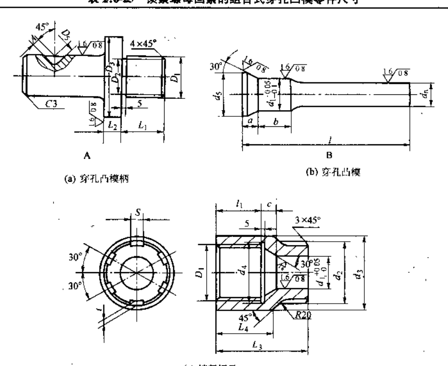
$$d_2=D_2+x;$$
$$d_3=D_1+x;$$
$$d_4=d_n;$$
$$d_5=1.01d_n+0.1\ \text{mm};$$
$$d_6=d_0+(1\sim2.5)\ \text{mm};$$
$$d_7=d_5+8\ \text{mm}，见图 2.6-48;$$
$$h_1=H_1-y;$$
$$h_2=H_2+(10\sim15)\ \text{mm};$$
$$h_3\geqslant20\ \text{mm};$$
$$a=5\ \text{mm};$$
$$b=35\sim45\ \text{mm}。$$

2) 穿孔凸模结构设计。穿孔凸模一般采用两种组合式结构，如图 2.6-47 和图 2.6-48 所示。

组合式穿孔凸模零件规格列于表 2.6-25 和表 2.6-26。



表 2.6-25　锁紧螺母固紧的组合式穿孔凸模零件尺寸　mm



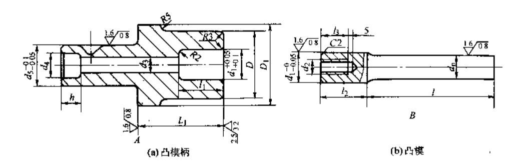
(a) 穿孔凸模柄　(b) 穿孔凸模

(c) 锁紧螺母

锻件穿孔直径 d_n	D_1	D_2	L_1	L_2	a	b	c	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	L_3	L_4	l_1	s	t
<28	M48	40	40	15	10	30	14	30	70	80	50	40	80	50	35	20	6
29~38	M60	50	50	20	12	30	16	40	80	90	62	50	90	60	45	20	6
39~50	M76	66	65	25	14	35	18	52	100	110	78	66	110	70	60	20	8
51~63	M95	85	75	30	16	40	20	70	115	130	98	85	130	85	70	25	10
64~78	M115	105	90	35	18	45	22	80	130	150	120	100	150	100	85	25	10

注：1. 凸模柄尾部尺寸和 D_3 由凸模夹持器确定。
　　2. l 由穿孔模膛设计确定。

表 2.6-26　内六角螺钉拉紧组合式穿孔凸模零件尺寸　mm



(a) 凸模柄　(b) 凸模

锻件穿孔直径 d_n	d_1	d_2	d_3	d_4	l_1	l_2	l_3	h
<30	35	M16×2	17	25	40	40	30	24
31~40	45	M20×2.5	21	32	50	50	35	26
41~50	55	M24×3	25	38	60	60	42	32
51~60	65	M27×3	28	42	70	70	48	35
61~70	75	M30×3.5	31	47	80	80	53	40

注：1. l_1、l 由穿孔模膛设计确定。
　　2. $D=(2\sim2.5)\ d_1$。

8.8 切边模膛设计

切边模膛的型式有两种，第一种用于垂直分模平锻机，第二种用于水平分模平锻机。

(1) 切边模膛设计

各部分的尺寸见图 2.6-49。

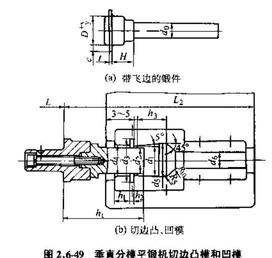


图 2.6-49 垂直分模平锻机切边凸模和凹模

刃口直径 $d_1 = D$ 或 $d_1 = D + \frac{x}{2}$

$$d_2 = D - 2\Delta \text{ 或 } d_2 = D + \frac{x}{2} - 2\Delta$$

式中，Δ 为凸模与凹模刃口间的间隙，mm，查表 2.6-27。

表 2.6-27 凸模和凹模刃口的径向间隙

mm

D	<30	30~80	80~160
Δ	0.3	0.4	0.5

$d_3 = D + 3C +$ (5~10) mm;

$d_4 = d_2 + 1 \sim 2$ mm (切边导向直径);

$d_5 = d_1 +$ (8~10) mm;

$d_6 = d_o +$ (1.5~3) mm;

$h_1 > 20$ mm;

$h_2 =$ (4~5) t;

$h_3 = H +$ (10~15) mm;

h_t 为凸模长度，由切边模膛图 2.6-49 和图 2.6-50 闭合长度设计确定，mm。

(2) 刮飞边板 (图 2.6-50)

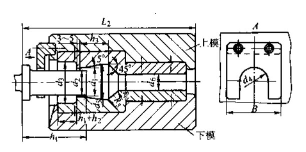


图 2.6-50 水平分模平锻机切边凸模和凹模

水平分模平锻机一般多采用刮飞边板，将飞边刮下落人地坑。有时也采用图 2.6-49 的型式，但必须设置吹扫飞边的压缩空气通道。

$d_4 = D +$ (2~3) mm;

$B = D + 2c +$ (10~20) mm。

8.9 切断模膛设计

(1) 切断模膛的用途

1) 将锻件从棒料上切断，如图 2.6-51 所示，当具有粗大部分的杆类锻件的杆部长度和直径之比小于 2.5 时，采用切断工步。

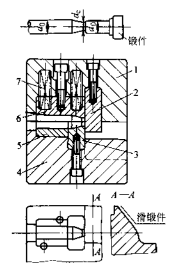


图 2.6-51 锻件分离的切断模膛

1—上模体；2—活动剪刀；3—固定剪刀；4—下模体；5—固定夹紧凹模；6—活动夹紧凹模；7—压缩弹簧

2) 切去穿孔后棒料上的废芯，如图 2.6-52 所示。当棒料直径 d_o 和卡细直径 d_c 之比 f 大于 1.25~1.40 mm 时，需要切去废芯 d_c，否则再次聚集不稳定，易产生折纹。

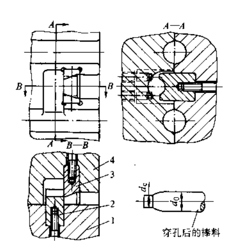


图 2.6-52 穿孔废芯切断模膛

1—活动凹模体；2—活动剪刀；3—固定剪刀；4—固定凹模体

(2) 固定剪刀尺寸 (表 2.6-28)

(3) 活动剪刀尺寸 (表 2.6-29)

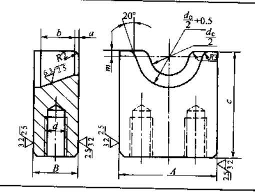
1) 对于从棒料切断锻件时，活动剪刀露出凹模体高度 h：$h = \frac{d_o + d_c}{2} +$ (10~20) mm。

2) 对于从棒料上切断废芯时，$h = d_c +$ (10~20) mm。

(4) 活动夹紧镶块 (图 2.6-53)

表 2.6-28　固定剪刀尺寸

mm



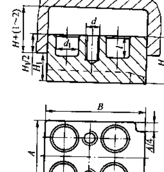
棒料直径 d_o	A	B	C	m	d
26~32	60	35	65	3	M14
32~38	75	40	80	4	M16
38~46	85	40	90	5	M16
46~56	95	45	100	6	M20
56~66	105	50	115	7	M20

注：a 为卡细刃口宽度，见表 2.6-21；b 为卡细模膛长度，见表 2.6-21；d_c 为卡细直径。

表 2.6-29　活动剪刀尺寸

mm

卡细直径 d_c	D	E	G	d
16~19	50	45	75	M16
19~24	55	45	80	M16
24~30	60	50	90	M20
30~37	75	50	95	M20
37~45	85	60	110	M24



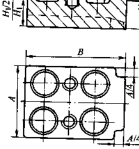


图 2.6-53　活动夹紧镶块

其外形尺寸的设计原则如下：

1）宽度 A 和长度 B 由模具设计总体布置确定，要能布置四个弹簧窝座和螺孔。

2）高度 H 要保证在活动剪刀碰到棒料卡细直径 d_c 和废芯直径 d_c 时，活动夹紧镶块已预先压上棒料，所以夹紧镶块露出凹模体的高度 H_1 大于活动剪刀露出凹模体的高度 h 如表 2.6-29 插图所示，即

$$H_1 = h + (20\sim30)\ \text{mm}$$

一般取　　$H = 1.5\ H_1$

8.10　管料聚集凹模和凸模

见图 2.6-54。

（1）工作凹模镶块

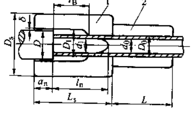


图 2.6-54　管料聚集凸模和凹模

1—工作镶块；2—夹紧镶块

1）模膛形状和尺寸　由聚集工步图确定。

2）模膛长度 $L = a_n + L_B$

式中，a_n 为凸模在凹模内的导向长度，mm，一般取 20~40 mm。

3）工作凹模镶块的外形尺寸

外径 $D_s = D_1 + 2\ m$

式中，m 为镶块最小壁厚，mm，由下式确定

$$m \geqslant 0.1D_1 + 20\ \text{mm}$$

长度 L_s 由模具设计总体布置和强度决定。

（2）凸模

凸模直径　　$D = D_1 - \delta$

式中，δ 为凸模和凹模之间的径向间隙，一般取 0.3~0.5 mm。

（3）管料夹紧镶块长度

$$L = (5\sim7)\ D_o$$

式中，L 为管料夹紧长度，mm；D_o 为管料外径，(mm)。

管料镦粗时，宜采用后挡板定位，后挡板能可靠地防止管料沿轴向移动。管料在模膛的夹紧部分很难牢固地夹紧，夹得太紧，管料易被压扁。

管料锻件杆部长度 $l<(4\sim5)\ D_o$ 时，宜采用把整个锻



件杆部放置在夹紧模膛内，此时需用管腔夹钳，如图 2.6-55。

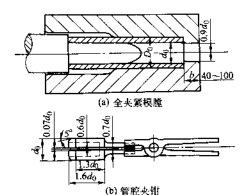


图 2.6-55 全夹紧模膛和管腔夹钳

9 典型锻件的工艺及其模具设计

9.1 一般设计程序

1）根据产品零件图绘制冷锻件图。

2）计算锻件体积（按锻件名义尺寸加正偏差之半）和重量。

3）设计锻件终锻工步，并计算其体积。

4）确定坯料直径、镦粗长度、镦粗比和坯料长度。

5）设计和计算工步图（所有尺寸均按热尺寸）。

6）计算锻件的锻造压力和模具尺寸，并考虑镦粗长度，最后确定设备规格。

7）模具设计

① 由设备安模空间尺寸进行总体设计，确定凸模夹持器、凹模体和凹模镶块，凸模和凸模柄等的形状和尺寸。

② 根据工步图设计模膛。

9.2 转向摇臂轴平锻工艺及模具设计

1）锻件图，见图 2.6-56。

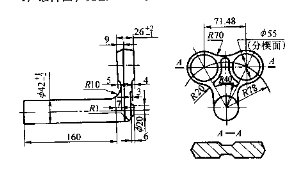


图 2.6-56 转向摇臂轴锻件图

2）锻件的体积和质量

锻件的体积 $V_{锻}=445\ 860\ mm^3$

锻件质量 $G=3.5$ kg

3）设计锻件终锻的形状并计算其体积。工艺分析：该零件是“具有粗大部分”的杆类锻件，采用钳子挡板，为了存放由于坯料的公差而多余的金属，并保证金属充满两个 $\phi55$ 法兰，需产生横向飞边，飞边设置在法兰 $\phi55$ 的中部，保证法兰充满。

飞边体积 $V_{飞}=22\ 489\ mm^3$

法兰体积 $V_{法}=219\ 721\ mm^3$

锻件镦锻部分体积 $V_{镦锻}=V_{法}+V_{飞}=242\ 210\ mm^3$

法兰的体积是指两个法兰 $\phi55$ 之外公切线间的体积见图 2.6-56。根据计算分析锻件其余部分的体积，坯料直径 $\phi42$ mm本身就足够，不需要聚集。

4）选择坯料直径 d_o、镦粗长度 l_B、镦粗比 φ 和下料长度 L。

① 该件是“具有粗大部分”的杆类锻件，取其杆部直径为坯料直径 $d_o=42$ mm。

② 镦粗长度：$l_B=180$ mm。

③ 镦粗比：$\varphi=4.3$。

④ 下料长度：$L=340$ mm。

5）设计和计算工步图，见图 2.6-57。

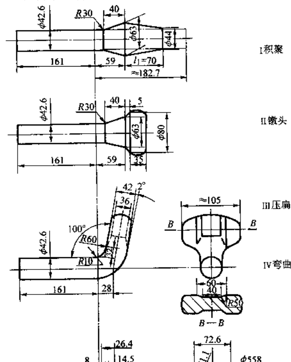


图 2.6-57 转向摇臂轴工步图（热尺寸）

镦粗长度的热尺寸 $l_B'=1.015\times180\ mm=182.7\ mm$

镦锻热体积 $V_{镦}'=(1.015)^3V_{镦}$

$V_{镦}=(1.015)^3\times242\ 210\ mm^3=25\ 327\ mm^3$

根据计算，该零件仅 $\phi55$ mm 两法兰之外切面之间的体积需要聚集，而锻件其余成形部分的体积，坯料直径 $\phi42$ mm本身就足够，不需要聚集。为此，该锻件采用聚集，压扁，弯曲，终锻，切边。其工步图见图 2.6-57，转向摇臂轴工步图。

① 第一工步（聚集） 凸模内的锥形，聚集 $\phi55$ mm 两法兰之外切面之间的体积如图 2.6-57 所示，凹模内的锥形是为了把弯曲工步时内层坯料压缩产生“接缝”挤入飞边。

② 第二工步（镦头） 其形状要保证两个 $\phi55$ mm 法兰能充满，又使产生的飞边体积为最小，经试验，其尺寸以 $\phi80\ mm\times35\ mm$ 为宜。并且在头部和杆部之间有一个和第一工步相同的锥体（$\phi42.6$ mm，$\phi63\ mm\times40$ mm）。

③ 第三工步（压扁）　压扁是为弯曲和终锻成形作好制坯准备，否则，弯曲时不易定位和头部坯料分配不均，影响金属流动。

④ 第四工步（弯曲）　用安装在夹紧滑块上的活动凹模内的压弯凸模将坯料弯曲成 100°（因锻件根部拐弯角度为 100°）。

⑤ 第五工步（终锻）　飞边厚度约 3.9 ~ 5.9 mm。

⑥ 第六工步（切边）　切去横向飞边，获得所需要的锻件。

6）计算锻件的锻造压力和模具宽度，从而确定平锻机吨位。

① 锻造压力　P = 9 500 kN。

② 凹模体的宽度　B = 1 060 mm。

查图 2.6-9 和表 2.6-6 选用 12.5 MN 水平分模平锻机。

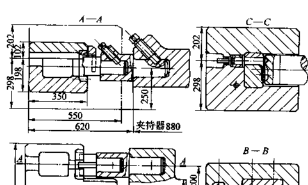
7）模具设计。该锻件的锻压力中心偏离锻件轴杆中心线 48 mm，见工步图 2.6-57。因此，凹模需有两个台阶的分模面，其中一个台阶分模面高度 250 mm。即正常分模面，另一个台阶分模面为 250 mm + 48 mm = 298 mm。

模具总图，见图 2.6-58。

终锻模膛中心线尽量靠近设备模锻中心，各模膛中心距取 180、200、200、200 mm，故凹模体宽度 B =（180 + 200 × 3 + 80 + 100 + 2 × 30）mm = 1 020 mm，凹模体长度 C = 550 mm。

夹持器长度 $L = L_p - l_凹 - a$ =（1 500 − 550 − 70）mm = 880 mm

式中，L_p 为 12.5 MN 水平分模平锻机封闭长度，L_p = 1 500 mm；$l_凹$ 为凹模体长度，$l_凹$ = 550 mm；a 为在封闭状态下，凸模夹持器和凹模体之间的间隔，取 a = 70 mm。



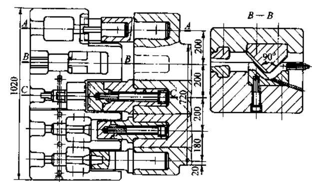


图 2.6-58　转向摇臂轴 12 500 KN 水平分模平锻机模具

9.3　轮毂轴管锻件平锻工艺及模具设计

1）锻件图，见图 2.6-59。

2）锻件的体积和质量

锻件法兰部分体积　$V_法$ = 671 975 mm³

锻件体积　$V_锻$ = 1 538 109 mm³

锻件质量　G = 12.1 kg

3）设计锻件终锻的形状并计算其体积。由于管料壁厚公差很大，为 22 mm ± 2.2 mm，为了工艺稳定，设计横向飞边。横向飞边外径取 150 mm，厚度 4 mm，见图 2.6-60 轮毂轴管平锻工步图。

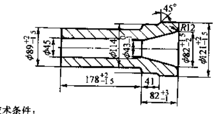


图 2.6-59　轮毂轴管冷锻件图

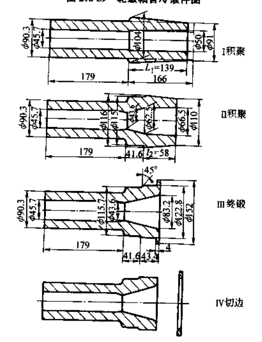


图 2.6-60　轮毂轴管平锻工步图

飞边体积　$V_飞$ = 23 914 mm³

终锻体积　$V_终$ = 695 889 mm³

4）计算镦粗长度 l_B，镦粗比 m_o，管料的“计算直径” d_{cp} 和下料长度 L。

①“计算直径” d_{cp}

$$d_{cp} = \sqrt{D_o^2 - d_o^2} = \sqrt{89^2 - 49^2} = 74.3 \text{ mm}$$

式中，D_o 为管料外径，D_o = 89 mm；d_o 为管料内径，臂厚取其负公差（−2 mm），故为 49 mm。

② 管料镦粗长度 l_B

$$l_B = \frac{V_终(1+\delta)}{\frac{\pi}{4}d_{cp}^2} = \frac{695\ 889 \times 1.015}{\frac{\pi}{4} \times 74.3^2} \text{ mm} = 163 \text{ mm}$$

式中，δ 为坯料加热烧损率，电感应加热 δ = 1.5%。

③ 管料镦粗比 m_o

$$m_o = \frac{l_B}{d_计} = \frac{163}{74.3} = 2.2$$

④ 下料长度 L

$$L = L_g + L_B = 179 \text{ mm} + 163 \text{ mm} = 342 \text{ mm}$$

5）设计和计算工步图。由于该锻件的坯料是厚壁管坯，镦锻时工艺较稳定，因此采用在凸模的锥形模膛内聚集。

聚集工步设计按管料镦粗（聚集）规则，按表 2.6-9 和

图 2.6-18，计算过程省略。轮毂轴管工步图如图 2.6-60。

6) 计算锻件的锻造压力、模具宽度、确定设备吨位

① 锻造压力　$F=9\ 000$ kN

② 凹模体宽度　$C=1\ 040$ mm

③ 查图 2.6-9 和表 2.6-6，选用 16 MN 水平分模平锻机。

7) 模具设计。总体布置：因为轮毂轴管锻件杆长仅两倍管料外径$\frac{178}{89}=2$，又是管料，不易夹紧，为此，需要把整个锻件杆部夹紧（见模具图 2.6-61），操作时，采用"管膛夹钳"夹持管料锻件。

① 凹模体　长×宽×高 = 540 mm×1 040 mm×280 mm

② 凸模夹持器　长×宽×高 = 965 mm×（280、240、330 mm）×220 mm，见图 2.6-62。

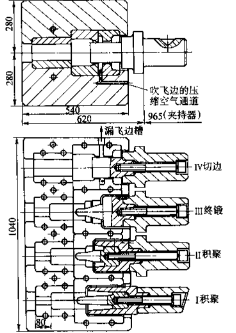


图 2.6-61　16 MN 水平分模平锻机的轮毂轴管平锻模

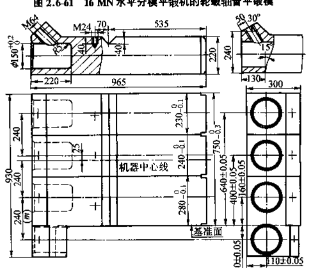


图 2.6-62　16 MN 水平分模平锻机凸模夹持器

10　平锻机热挤压工艺及模具设计

水平分模平锻机热挤压工艺，技术经济效果好，有宽广的发展前景。

10.1　水平分模平锻机挤压工艺分析

(1) 挤压工艺的可能性

水平分模平锻机夹紧力是镦锻力的 1～1.33 倍或更大，而垂直分模平锻机夹紧力仅是镦锻力的 0.33 倍，大的夹紧力使两块凹模不被挤开，分模面呈水平便于放置坯料。使挤压工艺可能实现。例如英国采用 4.5 MN 平锻机热挤压成形飞机发动机叶片。德国福特汽车公司用 12.5 MN 水平分模平锻机热挤压轿车万向节叉零件。

(2) 水平分模平锻机热挤压工艺的优缺点

平锻机是双向分模（凸模和凹模、凹模分两半），比普通锻压设备（例如热模锻压机和通用压力机）挤压有较多的优点。

1) 可挤压形状复杂的零件，如图 2.6-70 所示万向节叉。

2) 挤压模具结构简单。凹模是水平分开的，某些零件例如空心套管挤压时可省略顶料装置，把棒料插入空心套管内就可把挤压件取出，如图 2.6-63 所示。

设备有"有效后退行程"，可省去其他设备反挤压时模具卸锻件装置，模具结构简单，操作方便。

但是，由于凹模是水平分开式，挤压时在凹模分模面处要挤压出很薄的飞边（约 0.5～2 mm），因而需要增加一道冷切边工序。

10.2　挤压模结构及工作部分主要尺寸

1) 总体结构。平锻机热挤压模如图 2.6-63 所示，一般由凸模夹持器、凸模（凸模和凸模柄）、凹模（凹模镶块和凹模体）组成，在凹模体上配置有冷却润滑模具和吹扫氧化皮的喷嘴。总体结构与镦锻用的平锻模相同。

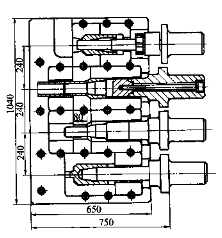


图 2.6-63　轴套管平锻机热挤压模

2) 热正挤压模工作部分主要尺寸。见表 2.6-30 和图 2.6-64。

正挤压凸模主要用来传递压力，但挤压空心件时，凸模芯棒是用来控制金属流动，所以芯棒长度 H_1 要保证在开始挤压前就已进入凹模金属挤压出口处。出口处形状很重要，底部锥角 $\alpha=90°\sim120°$为佳，当 $\alpha>120°$时，挤压时金属流动有"死角"，致使挤压件易产生折纹，凹模上要设置减少摩擦阻力的调节金属流动的工作带，如图 2.6-64，$\phi\times h$ 部分所示。

表 2.6-30 热正挤压模工作部分尺寸 mm

尺寸（参见图 2.6-64）	数 值
D	热挤压件大端直径
D_1	$D_1 = D -$（0.2～0.5）
D_2	热挤压件的内孔径
d	热挤压件小端直径
d_1	$d_1 = d + (0.5 \sim 1)$
H	$H = H_0$① $+ R_5 + (20 \sim 30)$
H_1	$H_1 = H_0 + h$
h	$h = (0.5 \sim 1)d$
α	90°～120°（最佳范围）

① H_0 为坯料或挤压前工作的高度。

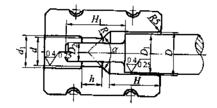


图 2.6-64 热正挤压模工作部分

3）热反挤压模工作部分主要尺寸。反挤压凸模起传递压力和控制金属流动的双重作用，所以反挤压凸模也要设计工作带 $\phi \times h$。凹模要设计凸模导向段，故使凸模和凹模的长度尺寸相应增加。见图 2.6-65 和表 2.6-31。

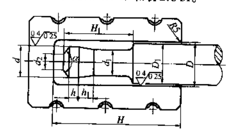


图 2.6-65 热反挤压模工作部分

表 2.6-31 热反挤压模工作部分尺寸 mm

尺寸（参见图 2.6-65）	数值
D	热挤压件外径
D_1	$D_1 = D -$（0.2～0.5）
d	热挤压件内径
d_1	$d_1 = d -$（1～2）
d_2	$d_2 = 0.5d$
H	$H = H_0$① $+ H_1 + R_5 +$（20～30）
H_1	热挤压件内孔深度 +20
h	30～40
h_1	$h_1 = 2h$
α	$\alpha = 120°$

① H_0 为坯料高度。

10.3 热挤压举例

（1）轴套管正挤压

原始数据为，锻件体积 $V = 1\ 160\ 000\ \text{mm}^3$，锻件重量 $G = 9.1$ kg，材料 45 钢，图 2.6-66 为锻件图。

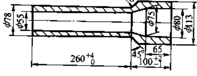


图 2.6-66 轴套管锻件图

1）确定坯料尺寸。为了使坯料放入模膛定位准确，减少锻件壁厚差并考虑第一工步为冲孔制坯成形，减少凸模受力，按第一工步凹模模膛直径即按锻件法兰部分直径 ϕ113 mm，选用 80 mm × 80 mm × 183 mm 方料。

2）确定工步数和挤压力，见图 2.6-67。

① 变形程度 $F_0 = \frac{\pi}{4}(D^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4}(114.5^2 - 56.5^2)$ mm

$= 7\ 786\ \text{mm}^2$

$$F_1 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_3^2) = \frac{\pi}{4}(79^2 - 55.8^2)\ \text{mm}$$

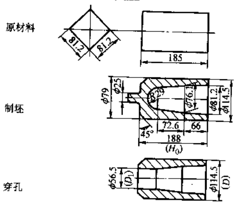
$= 2\ 455\ \text{mm}^2$

式中，F_0、F_1 为变形前后坯料的横截面积。

挤压比 $R = \frac{F_0}{F_1} = \frac{7\ 786}{2\ 455} = 3.2$

② 工步设计见图 2.6-67。

坯料热体积 $V = 1\ 225\ 075\ \text{mm}^3$



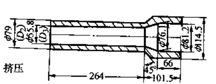


图 2.6-67 轴套管工步图（为热尺寸，单位 mm）

a）第一工步冲孔制坯（反挤压）。内孔形状基本和终锻相符，后端有尾部，存放多余金属，是由坯料公差产生的，凹模模膛外径取锻件外径。

充不满系数 $K = 1.06$

计算后得冲孔后的坯料长度 $l_1 = 188$ mm

b）第二工步穿孔工步。要挤出通孔锻件，必须穿去连皮。

c）第三工步挤压成形。挤压行程为

$$H_0 - H_1 = 188 - 101.5\ \text{mm} = 86.5\ \text{mm}$$

式中，H_0 为坯料长度，$H_0 = 188$ mm；H_1 为锻件法兰高度，$H_1 = 101.5$ mm。

毛坯相对高度 $\frac{H_0}{D_0} = \frac{188}{114.5} = 1.64$

③ 挤压力计算。查图 2.6-68，得 45 钢挤压的单位面积压力 $\sigma = 470$ MPa（1 100℃时），则挤压力 P 为

$P = \sigma F_0 = 470 \times 7\ 786\ \text{N} = 3\ 659\ 420\ \text{N}$

$P \approx 3\ 660\ \text{kN}$

参照图 2.6-69 16 MN 平锻机镦锻力允许负荷图，可选用 16 MN水平分模平锻机。

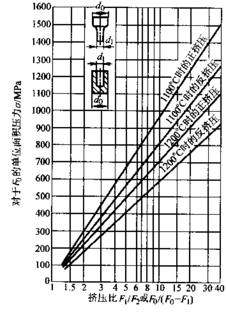


图 2.6-68　45 钢挤压的单位面积压力图线

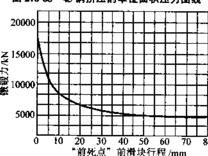


图 2.6-69　16 MN 平锻机镦锻力允许负荷图

3）模具设计，见图 2.6-63。

① 模膛设计。模膛的形状和尺寸按轴套管工步图和热正挤压模工作部分图 2.6-64，表 2.6-30 进行设计。

挤压工作带长度 $h = (0.5 \sim 1)d = (0.5 \sim 1) \times 79\ \text{mm} = (39.5 \sim 79)\text{mm}$，取 $h = 80\ \text{mm}$。

② 镶块外径和长度。为提高镶块寿命，取镶块外径 $\phi240$，长度由需要确定。

③ 模具总图。按 16 MN 水平分模平锻机安模空间参数和镶块大小进行合理布置，和镦锻模设计相同。

(2) 万向节叉热挤压

万向节叉的锻件图如图 2.6-70 所示。

原始数据：锻件材料 40MnB，锻件体积 $V = 474\ \text{cm}^3$，锻件重量 $G = 3.72\ \text{kg}$。

1）确定坯料尺寸　锻件的最小外径为 $\phi90$，确定坯料尺寸为 $\phi90 \times 78$。

2）确定工步数和计算挤压力

① 反挤压锥孔的变形程度和挤压力

a）变形程度

挤压比

$$R = \frac{F_0}{F_0 - F_1} = \frac{6\ 359}{6\ 359 - 4\ 416} = 3.3$$

式中，F_0、F_1 为变形前后的坯料横截面积。

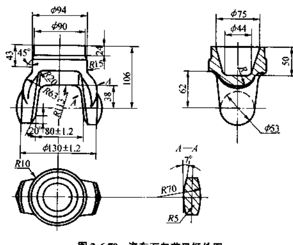


图 2.6-70　汽车万向节叉锻件图

$$F_0 = \frac{\pi}{4}d_0^2 = \frac{\pi}{4} \times 90^2 = 6\ 359\ \text{mm}^2,$$

$$F_1 = \frac{\pi}{4}d_n^{\ 2} = \frac{\pi}{4} \times 75^2 = 4\ 416\ \text{mm}^2。$$

b）反挤压力。由挤压比 $R = 3.3$ 查图 2.6-68 得单位挤压力 $\sigma = 400$ MPa（1 100℃），得最后瞬间挤压力 $P = \sigma F_1 = 400 \times 4\ 416\ \text{N} = 1\ 766\ 400\ \text{N}$，$P \approx 1\ 766\ \text{kN}$。

② 正挤"叉口"

a）挤压比

$$R = \frac{F_0}{F_1} = \frac{6\ 359}{2\ 800} = 2.27$$

式中，F_0、F_1 为变形前后的坯料横截面积，

$F_0 = \frac{\pi}{4}d_0^{\ 2} = \frac{\pi}{4} \times 90^2\ \text{mm}^2 = 6\ 359\ \text{mm}^2$，由作图测得 $F_1 = 2\ 800\ \text{mm}^2$。

b）正挤压力 P

$$P = \sigma F_0$$

式中，σ 为单位面积挤压力，由挤压比 $P = 2.27$，查图 2.6-68，得 $\sigma = 340$ MPa（1 100℃）；F_0 为凸模面积（mm^2）；

$$F_0 = \frac{\pi d_0^{\ 2}}{4} = \frac{\pi}{4} \times 90^2\ \text{mm}^2 = 6\ 359\ \text{mm}^2$$

挤压力　$P = \sigma F_0 = 340 \times 10^6 \times 6\ 359 \times 10^{-6}\ \text{N} \approx 2\ 162\ \text{kN}$

挤压行程约 33 mm。

③ 挤压工步数。根据万向节叉形状，不需要制坯或预成形，又根据挤压力计算和 16 MN 平锻机镦锻力允许负荷图如图 2.6-71 所示，在一个行程里可以同时挤压两件，其工作负荷曲线没有超过镦锻力允许负荷图，即一个工步就可挤压成形。

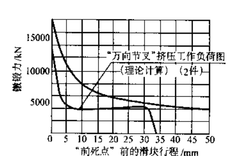


图 2.6-71　挤压工作负荷图和 16 MN 平锻机镦锻力允许负荷图



3）挤压模设计

① 模膛设计。为了改善金属流动，挤压模膛的出口处圆角要大一些，原设计全部为 $R12$ mm，经试验，在两个叉子的四个底面有流线折纹，后改为由 $R12$ mm 均匀过渡到 $R20$ mm，流线折纹消除。底面设计成 $R113$ mm，以减小挤压死角，见图 2.6-70。挤压模膛导程直径设计成 $\phi92.3$ mm，这是考虑 $\phi90$ mm 热轧钢材在正公差时（$\phi90$ mm + 0.9 mm，考虑热收缩率）也能顺利地放入模膛。导程直径不可太大，否则，当坯料放入模膛，上模夹紧时，坯料和模膛的径向间隙都在上模。这样，在坯料挤压时将引起较大的壁厚差和纵向飞刺。

② 挤压模结构。如图 2.6-72 所示。在凹模上同时布排四个挤压模膛，在生产时，可以在模具上对称放置两件坯料。设备受力均匀，安模空间也充分利用。

另外，为了使锻件便于起模，在模具上设计顶料装置。

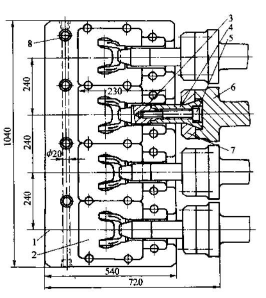


图 2.6-72 万向节叉热挤压模具
1—凹模体；2—凹模镶块；3—凸模；
4—凸模座；5—螺钉；6—凸模柄；
7—夹持器；8—螺栓

编写：赵一平（东风汽车公司锻造厂）

第7章 闭式模锻

1 闭式模锻的特点及应用

1.1 闭式模锻的特点

开式模锻（图2.7-1a）时锻件沿分模面周围形成横向飞边，闭式模锻（图2.7-1b）时不形成横向飞边。

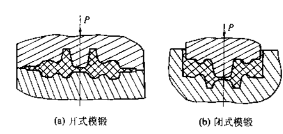


图2.7-1 开式模锻与闭式模锻简图

闭式模锻亦称无飞边模锻，模锻时坯料金属在封闭的模膛中成形。因此，闭式模锻可以使得锻件的几何形状、尺寸精度和表面质量最大限度地接近于产品零件的几何形状、尺寸精度和表面质量。同开式模锻相比，闭式模锻有如下特点：

（1）优缺点比较

1）材料利用率高。闭式模锻，没有飞边金属损耗，锻件可以设计成空心的，可以取消或设置很小的拔模斜度，精度高，因而可以节约大量的金属材料。与普通模锻相比，可节约金属30%～50%，材料利用率可达40%～90%，一些中小型锻件的材料利用率可稳定在70%以上。

2）锻件性能好。闭式模锻件金属流线大都沿零件的内外轮廓分布，机械加工时被切断的纤维流线少，其强度指标一般可提高30%以上。此外，闭式模锻件消除了开式模锻件因切边而造成的金属流线末端外露的现象，提高了锻件抗应力腐蚀的能力。这对某些对应力腐蚀敏感的合金钢和使用在氯化物、硫化物工作环境中的零件有特殊意义。

3）能提高金属的塑性。闭式模锻时，毛坯处于三向压应力状态，有利于提高金属的塑性，这一点对于塑性差、锻造温度范围窄的高合金钢、镍基合金、钛合金等是极为有利的。可见，闭式模锻既适合于一般有色金属、黑色金属，也适合于高合金钢和一些特殊合金。从锻件的形状来看，有关中空的架体、活塞、轴类、筒形件、各种阀体和管接头以及其他承受高温高压的多孔类零件都可采用可分凹模闭式模锻。

4）生产率高。据统计，以可分凹模闭式模锻代替普通开式模锻，工步数可以从2～4个减少到1～2个，生产率平均可提高25%～50%。

5）改善劳动条件。可分凹模闭式模锻主要是采用机械压力机和液压机作为模锻设备，一般均配备感应加热，有利于实现机械化和自动化生产，同时，污染甚微，没有大量的热辐射，改善了锻工车间的工作环境和劳动条件。

闭式模锻也存在一些缺点：要求坯料尺寸与重量精确、加热质量较高；可分凹模模具或专用装置结构比较复杂，制造较困难且费用较高。

（2）模具寿命的比较

对于一些小型锻件，无论是整体凹模闭式模锻（形状简单的锻件），还是可分凹模闭式模锻（形状复杂的锻件），因模锻时模具吸热与散热基本平衡，模具寿命高于或至少相当于开式锻模的寿命。可分凹模模锻结构钢锻件时，模具寿命为3 000～15 000件，模锻黄铜锻件时其寿命可达10万件以上，对于一些中型和大型锻件，闭式模锻时模具升温快，磨损也快，因此模具寿命一般低于开式锻模的寿命。随着适合于热挤压模具钢的出现，闭式锻模的寿命正在迅速提高。

当前，可分凹模模锻主要沿两条技术路线发展。一是由通用模架和可更换的凸、凹模镶块构成可分凹模组合结构，安装在通用锻压设备如热模锻压力机或普通曲柄压力机、液压机和螺旋压力机上使用，实现一些小型锻件的可分凹模模锻；二是采用专用设备，如机械式、液压式或机械－液压联合式的多向模锻压力机，实现各种复杂锻件的多向模锻。

1.2 闭式模锻的应用

闭式模锻分为整体凹模闭式模锻和可分凹模闭式模锻。整体凹模闭式模锻主要用于生产圆饼类锻件，如各种齿轮坯和直齿伞齿轮、长度尺寸不太大的轴对称锻件，如阶梯轴、螺钉、铆钉。

利用可分凹模闭式模锻可以获得形状复杂和相对尺寸变化大的锻件，如法兰、壳体、分枝和带叉形的、有筋的和加长形的等等。这些锻件中形状最简单的锻件的一般特征是：由两部分组成，主体为实心或空心圆柱体或棱柱体，周边为法兰、凸台、枝芽或筋。复杂锻件是由中心部分和与其相连的若干简单部分组成。杠杆和连杆类的长形锻件可算作这类锻件的典型例子。

在模锻件中，饼盘类、长轴类和枝芽类约占50%。饼盘类中质量在2～3 kg以内均可采用无飞边或小飞边闭式模锻，其产量约为所有饼盘类锻件产量的40%～50%；长轴类中的小型阶梯轴以至小型连杆均可采用单冲头可分凹模模锻；枝叉类中质量在2～3 kg以内的锻件可采用单冲头或多冲头可分凹模模锻，其产量约占这类锻件产量的25%～30%；此外，还有其他一些类型的锻件可采用无飞边或小飞边闭式模锻。据估计，可采用无飞边或小飞边模锻的锻件可达整个锻件产量的30%以上。小型汽车用的锻件可采用且要求采用闭式精密模锻生产的超过其所需锻件的50%。随着国产小汽车和引进小汽车用锻件的国产化，闭式模锻工艺节省金属材料的优越性将得到更加充分的发挥。

表2.7-1为采用有飞边模锻和可分凹模模锻（即小飞边模锻）生产十字轴和万向节叉时的对比情况。

表 2.7-1 十字轴、万向轴叉采有有飞边模锻和可分凹模闭式模锻的情况对比

锻件名称及编号		锤上有飞边模锻				压力机上可分凹模模锻				单件节省金属材料的情况	
		锻件质量 /kg	坯料质量 /kg	名义消耗 /kg	材料利用率 /%	锻件质量 /kg	坯料质量 /kg	名义消耗 /kg	材料利用率 /%	/kg	/%
十字轴	1	0.294	0.41	0.42	70	0.295	0.315	0.32	92	0.1	24
	2	0.7	0.908	0.924	75	0.69	0.71	0.72	96	0.2	22
	3	1.2	1.65	1.75	69	1.17	1.24	1.27	93	0.48	27
	4	2.2	2.9	3.2	69	2.2	2.27	2.32	95	0.98	30
万向节叉	1	1.32	1.77	1.835	72	1.32	1.47	1.54	86	0.29	16
	2	2.3	2.99	3.165	72.5	2.3	2.56	2.68	86	0.48	15
	3	4.2	5.5	6.341	66	4.2	4.7	5.3	79	1.04	16.5
	4	7.3	9.1	9.9	74	7.3	7.85	8.1	90	1.8	18

2 闭式模锻件的分类及表示锻件复杂程度的参数

2.1 锻件的分类

锻件的种类繁多，其几何形状的复杂程度和相对尺寸的差别很大。为了制订精密模锻工艺、确定合理的毛坯形状和尺寸，首先应将锻件分类。无疑，形状相似的锻件，其精密模锻工艺及模具的结构基本相同。因此，目前比较一致的分类方法是按照锻件形状并参考精密模锻时毛坯的轴线方向来分类的。精密模锻件的分类情况见表 2.7-2。

第一类（饼盘类）锻件。其外形为圆形而高度较小。精密模锻时毛坯轴线方向与模锻设备的作用力方向相同，金属沿高度和径向同时流动。对于结构简单的饼盘类锻件，一般只需一个终锻工步即可；对于结构复杂的，如编号为 135、144 和 145 所示齿轮坯锻件，若在热模锻压力机上闭式模锻，在终锻工步前通常还需镦粗制坯和预锻工步。编号为 154、155 所示圆锥齿轮锻件，无论采用开式或闭式精密模锻，均能直接终锻出齿形。

第二类（法兰突缘类）锻件。其外形为回转体，带有圆形或长宽尺寸相差不大的法兰或突缘。闭式模锻时，一般只需一个终锻工步。

第三类（轴杆类）锻件。其杆部为圆形，带有圆形或非圆形头部，或中间局部粗大的直长杆类。这类锻件中，对于编号为 313 所示的杯杆形阶梯轴可采用闭式镦粗与反挤复合成形工艺；其余的轴杆类锻件一般都采用闭式局部镦粗成形。

第四类（杯筒类）锻件。这类锻件多采用闭式反挤、正反复合挤压或镦粗冲孔复合成形。

第五类（枝芽类）锻件。包括单枝芽、多枝芽的实心和空心类锻件。这类锻件多采用可分凹模模锻或多向模锻。

第六类（叉形类）锻件。包括带有空心或实心杆部、带有圆形或非圆形法兰等多种结构形式。这类锻件常常需要两个工步以上的可分凹模模锻，即预成形和终锻。

从表 2.7-2 所示六种类型锻件的外形特点可以看出，前四类，即饼盘类、法兰突缘类、轴杆类和杯筒类属于旋转体；后两类，即枝芽类和叉形类属于非旋转体。

2.2 表示锻件复杂程度的参数

锻件形状对模锻时金属流动和变形力有很大影响，因此，必须找出表示锻件形状复杂程度的参数。

(1) 锻件形状复杂系数的一般表达式

表 2.7-2 闭式模锻件的分类

分类及编号	1	2	3	4	5
第一类（饼盘类）	111	112	113	114	115
		122	123	124	125
		132	133	134	135
				144	145
				154	155

续表 2.7-2

分类及编号	1	2	3	4	5
第二类（法兰突缘类）	211	212	213	214	215
第三类（轴杆类）	311	312	313	314	315
第四类（杯筒类）	411	412	413	414	415
第五类（枝芽类）	511	512	513	514	515
第六类（叉形类）	611		612		613

锻件形状复杂系数 C_G 是锻件体积 $V_{锻}$ 与相应的锻件外轮廓包容体的体积 $V_{外}$ 的比值，即

$$C_G = \frac{V_{锻}}{V_{外}} \tag{2.7-1}$$

圆形锻件的外轮廓包容体的体积（图 2.7-2）

$$V_{外} = \frac{\pi}{4} D^2 H \tag{2.7-2}$$

非圆锻件的外轮廓最小包容体体积（图 2.7-3）

$$V_{外} = lbh \tag{2.7-3}$$

由图可知，C_G 越大，形状越简单。通常将其分为四级：

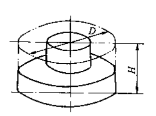
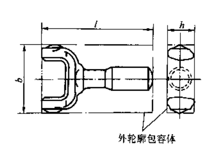




图 2.7-2　圆柱体锻件及其外接圆柱体

简单的，$C_G = 0.63 \sim 1$；一般的，$C_G = 0.32 \sim 0.63$；较复杂的，$C_G = 0.16 \sim 0.32$；复杂的，$C_G \leqslant 0.16$。



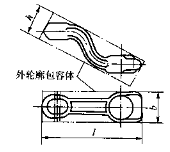


图 2.7-3　非圆形锻件及其外轮廓最小包容体

(2) 回转体锻件的形状复杂系数

Г.Π. 捷捷林等在研究飞边槽尺寸设计时，提出了回转体锻件的形状复杂系数 C_r，其表达式为：

$$C_r = \alpha\beta \tag{2.7-4}$$

式中，α、β 为锻件纵、横截面形状复杂系数。

其中，纵截面形状复杂系数

$$\alpha = \frac{C_{锻}}{C_{外}} = \frac{L^2/F}{L_c^2/F_c} \tag{2.7-5}$$

式中，$C_{锻}$ 为回转体锻件轴向断面周长 L 的平方与其轴向断面面积 F 之比；$C_{外}$ 为锻件外接圆柱体轴向断面周长的平方与外接圆柱体的轴向断面面积 F_c 之比。

横截面形状系数

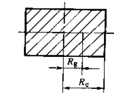
$$\beta = \frac{2R_g}{R_c} \tag{2.7-6}$$

式中，R_g 为对称轴至半个纵截面的质心间的径向距离；R_c 为锻件外接圆柱体的半径。

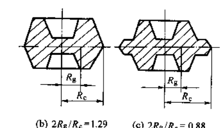
由式（2.7-5）可以看出，在锻件外接圆柱体的高度和直径不变的条件下，空腔愈多、愈窄、愈深，则锻件的周长愈长、纵截面面积愈小，相应的 L_c^2/F_c 值愈大。这个比值没有完全考虑空腔在锻模上的位置：对于具有相同宽度和深



度的空腔，它们位于轴线附近或者位于外围，其 L_c^2/F_c 值是相同的。然而，根据实验结果，中心空腔比外围空腔能更好、更易充满。式（2.7-6）的 β 值考虑了空腔在锻模中的分布。对于圆柱形锻件（图 2.7-4a），$2R_g/R_c=1$；对于带有法兰的锻件（图 2.7-4c），其 β 值比无法兰的类似锻件（图 2.7-4b）要小。这是因为法兰突缘在某种程度上起到了飞边的作用，有利于锻件充满，因而其复杂程度要小一些。



(a) $2R_g/R_c=1$



(b) $2R_g/R_c=1.29$　(c) $2R_g/R_c=0.88$

图 2.7-4　空腔在模内的位置

由此可见，形状复杂系数反映了回转体锻件纵截面相对于锻件外接圆柱体纵截面的复杂程度。

不难想像，在其他条件相同的情况下，锻件形状复杂系数的大小，可反映其锻件在模锻成形时金属充满模膛的难易程度和所需变形力的大小等主要工艺性能。

(3) 枝叉类锻件的成形难度系数

对于枝叉类锻件，不可能提出类似于回转体锻件那样的形状复杂系数来表示几何形状的复杂程度对其工艺性能上的难易程度的影响。枝芽和叉形件若采用开式精模密锻，很难获得理想的效果。径向挤压和正向分流挤压是近十多年来针对枝叉类零件的形状特征所研究开发出的精密成形新工艺，应用效果显著。根据能反映变形金属在模膛内流动充满时的难易程度和所需变形力或功的大小等主要工艺性能，可以提出用锻件的成形系数来表示：

$$\lambda = F_c/\Sigma F_b \qquad (2.7\text{-}7)$$

式中，F_c 为工作筒（原毛坯）横截面面积（图 2.7-5）；ΣF_b 为枝芽模膛横截面面积之和（图 2.7-5）。

图 2.7-5 所示为十字轴径向挤压模锻时，变形金属作用于冲头上的单位压力 p 同侧向枝芽的个数 z 及尺寸比 $\frac{d}{D}$ 间的关系曲线。枝芽的个数 z 和尺寸比 $\frac{d}{D}$ 两者综合在一起，实质上代表了比值 $F_c/\Sigma F_b$。由图可以看出，从左到右，随比值 $F_c/\Sigma F_b$ 不断减小，由冲头所施加的单位变形力逐渐降低。这是因为模膛侧枝通道越多，金属材料被挤出形成侧向枝芽的阻力越小。

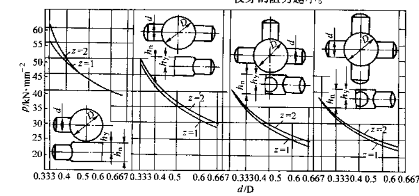


图 2.7-5　单位压力 p 与 $\frac{d}{D}$ 的关系曲线

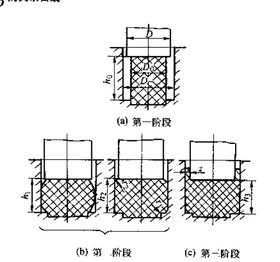
3　闭式模锻变形过程分析

3.1　镦粗式闭式模锻的变形过程

镦粗式闭式模锻也称闭式镦粗，其变形过程可以分为三个阶段（图 2.7-6）：开式镦粗阶段；充满角隙阶段；挤出端部飞边阶段。

1) 开式镦粗阶段（图 2.7-6a）。开式镦粗即自由镦粗，从坯料与冲头或上模膛表面接触开始到坯料金属与模膛（最宽处）的侧壁接触为止。与开式镦粗一样，闭式镦粗也分整体式闭式镦粗和局部闭式镦粗两类。前者都是以坯料外径定位，而后者都是以坯料的不变形部分定位。

2) 充满角隙阶段（图 2.7-6b）。即从毛坯的鼓形侧面与凹模侧壁接触开始，到整个侧表面与模壁贴合且模膛角隙完全充满为止。在这一阶段中，变形金属的流动受到模壁的阻碍，变形金属各部分处于不同的三向压应力状态。随着毛坯变形程度的增加，模壁承受的侧向压力逐渐增大，直到模膛完全充满为止。



(a) 第一阶段

(b) 第二阶段　(c) 第三阶段

图 2.7-6　闭式镦粗时充满模膛的三个阶段

3）挤出端部飞边阶段（图 2.7-6c）。即充满模膛后的多余金属在继续增大的压力作用下被挤入凸、凹模之间的间隙中，形成环形纵向飞边。对于形状特别复杂的闭式模锻件，某些角部在变形的第二阶段结束时不能完全充满，而需要继续加大压力，在凸、凹模间形成端部环形纵向飞边，才能把金属挤入未充满的角隙，得到合格的锻件。其次，当坯料尺寸偏差较大时，多余金属也只有挤进凸、凹模间的间隙才能达到锻件所要求的尺寸。因此，闭式模锻的第三阶段往往又是不可避免而又不可缺少的。

3.2 镦粗压入式闭式模锻变形过程

以环形件为例，其镦粗压入式闭式模锻过程可以分为三个阶段，如图 2.7-7 所示。

第一阶段：如图 2.7-7a 所示，坯料冲孔和镦粗，与开式模锻无甚差别，仅结束时间略长，因为无飞边，坯料体积比开式模锻的小得多，其鼓形与模壁接触较迟。

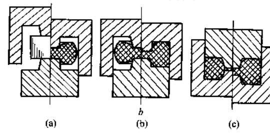


图 2.7-7 镦粗压入式闭式模锻过程

第二阶段：如图 2.7-7b 所示，金属流动特性与开式的不同，模壁限制了径向流动，只能向模膛上下底部充填。当金属与底部接触时，第二阶段结束。

第三阶段：如图 2.7-7c 所示，模膛内各圆角半径处被充满，直到出现纵向飞边为止。

为了了解闭式模锻第二、三阶段金属流动的特点及塑性变形区的形状，林治平教授利用铅试件坐标网格法对如图 2.7-8 所示七类锻件作了研究。图中 *o-o*、*a-a*、*b-b* 表示金属的分流轴或分流面，阴影区表示刚性区，箭头表示金属流动方向。由图及以上分析可以得出如下结论。

1）在圆柱体闭式镦粗的第二阶段，变形区分布状况与锻件高径比有关。高径比大于 1（图 2.7-8a）时，上半部和中心区的变形早已结束，相当于刚性区，下半部在上半部作用下继续镦粗，把金属挤入上下角隙，变形区呈盆状。高径比接近于或小于 0.5（图 2.7-8b、c）时，中心部分相当于刚性区，变形区呈空心凹盆状。显然，锻件高径比对变形区的这种影响，是由于毛坯同凹模模壁间的接触摩擦所引起的。当 $H/D>1$ 时，摩擦的作用有利于上角隙的充满，随着变形的继续进行变形区将逐渐缩小，最后集中到下角隙。当 $H/D\leqslant0.5$ 时，摩擦影响很小，上下角隙几乎同时充满，上下变形区均保留到变形结束。当模膛充满后尚有多余金属，或锻件形状复杂需形成纵向飞边方能充满全部角隙时，最后变形区将集中在飞边附近。

2）所有复杂锻件的截面，均可分解为若干简单矩形单元，其变形区模型相当于各简单矩形截面变形区模型的组合，如图 2.7-8d～g 所示。所以，只要利用简单矩形截面的变形区模型计算出圆柱体闭式镦粗和反挤的变形力，就能计算出任意复杂锻件闭式模锻的变形力。

3）闭式模锻时，在图 2.7-8e～g 类锻件外轮缘上出现分流面，分流面以外金属挤入外角隙，分流面以内金属挤入内角隙。这样，对于复杂回转体锻件，除了角部变形区外，还存在由薄辐板延伸到外轮缘分流面附近的塑性变形区。如果锻件较复杂，圆角尺寸较小，需要形成纵向飞边才能充满角隙，其变形区模型如图 2.7-8h 所示。因此，对于复杂闭式模锻件，其变形区模型可有三类：辐板镦粗和充满角隙（图 2.7-8g）；充满轮缘角隙，其余同开式模锻（图 2.7-9a）；多余金属挤入飞边（图 2.7-9b）。

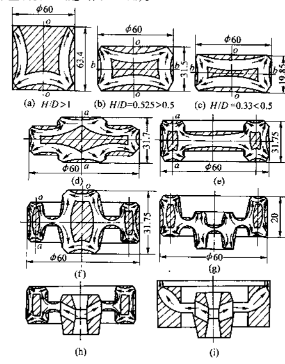


图 2.7-8 闭式模锻第二、三阶段的变形区模型

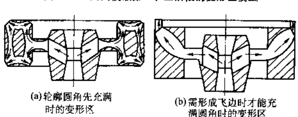


图 2.7-9 不同情况的最后变形区

3.3 侧向挤压模锻

侧向挤压模锻也称侧向挤压，当锻件的枝芽部分同本体轴线垂直时则称径向挤压。按照挤压模锻时金属流动的特点，侧向挤压又可分为分流式、汇集式和弯曲式三类。

分流式侧向挤压即毛坯金属在一个冲头作用下同时或先后向几个不同的方向流动。

汇集式侧向挤压即毛坯金属在两个冲头作用下同时或先后向一个或一个以上的方向流动。

弯曲式侧向挤压即毛坯金属通过冲头挤压的方式使其产生弯曲变形。

1）侧向挤压时的金属流动。侧向挤压模锻时，无论是哪种方式，其变形过程大体可分为：自由镦粗、侧向挤压、充满模膛角隙和挤出多余金属等四个阶段。自由镦粗、充满模膛角隙和挤出多余金属等三个阶段的变形过程及特征与前述闭式镦粗和正、反挤压模锻中相对应阶段的情况完全相同。这里，着重讨论侧向挤压阶段的金属流动。

图 2.7-10 为十字轴和 T 形件闭式模锻时坯料金属在模膛的侧向通道中流动的状况。可以看出，当坯料在挤压力 P_1 的作用下流入侧向通道时，其流出的金属首先同侧向通道底部接触，然后旋转偏向顶部，即使是自由流动阶段，也是底部的金属流动比上部的金属流动强烈，在上部从 *A* 点到 *B*



点形成凹坑而金属不贴紧上模壁，凹坑的大小取决于 D/d_0 值和侧孔轴线相对于冲头轴线间的夹角。在下部自 E 点向左的金属不贴紧模底，而是形成凸起，其凸起的径向尺寸小于侧孔直径 d_0。变形金属在侧向通道中的整个自由流动阶段，其轴线不垂直于冲头的运动方向。

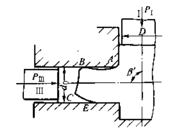


图 2.7-10 模锻十字轴时侧孔中的金属流动

如果把图 2.7-10 所示侧向挤压称为单冲头侧向挤压，那末，对于T形件常常采用如图 2.7-12 所示的双冲头对向挤压，此时，即使进入侧向通道中的金属处于自由流动状态，其枝芽的轴向也是垂直于冲头Ⅰ、Ⅱ的轴线，而不会出现单冲头侧向挤压时金属流动所出现的现象。

2）侧向挤压时的滑移线场分析。侧向挤压时的变形过程和特点，通过滑移线场法可对其机理作出进一步的分析。

对于图 2.7-10 所示的侧向挤压，处于冲头Ⅰ下面的均匀应力状态区沿冲头运动方向移动，当其移到模膛侧向通道的入口处，以与 x 轴或一定角度并指向侧向通道（即Ⅲ通道）型腔底部移动。图 2.7-11 所示为主、侧通道直径之比 $D/d=1$、1.2、1.6 三种情况下试件子午面上的滑移线场和金属在侧向通道中流动时的速度矢端图。这样运动的结果，导致已流入侧向通道中的金属与靠近冲头Ⅰ的模壁分离，在拐角处形成凹坑（图 2.7-10）。

当冲头Ⅰ、Ⅱ同时同速对毛坯施加压力时，两个冲头前面的均匀应力状态区向侧向通道中移动，其方向与 x 轴成相同的夹角，并与 x 轴对称，所构成的合成速度方向与 x 轴平行。图 2.7-12 所示为主、侧通道直径比 $D/d_0=1$；1.2；1.6 三种情况下试件子午面上的滑移线场和速度矢量图。通过对比可知，两冲头对挤时，坯料金属变形均匀，不会出现凹坑现象。

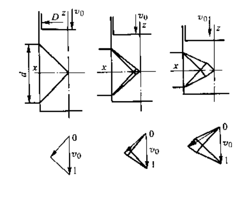


图 2.7-11 单冲头侧向挤压时子午面上滑移线场和速度矢量图

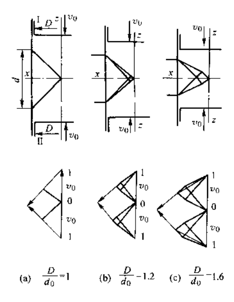


图 2.7-12 双冲头侧向挤压时子午面上的滑移线场和速度矢量图（侧向通道中摩擦为 0）

4 闭式模锻变形力的计算

确定精密模锻所需的变形力，是为了合理选择或设计所需的模锻设备，正确设计模具和制订工艺方案。

4.1 影响闭式模锻力的主要因素

除了锻件材料性质、变形温度和变形速度外，还有锻件圆角半径、接触摩擦和锻件形状等也影响模锻力。

（1）锻件圆角半径的影响

锻件圆角半径相当于模具角部径向未充满值 a。由实验得出的 a 与闭式模锻力间的关系如图 2.7-13 所示。由图可以看出，闭式镦粗力与未充满值成线性反比关系，即力 P 随 a 值的减小而升高。另外，由于凹模模壁摩擦的影响，当 $H/D>0.5$ 时，P 值随 H/D 的增加而增加，当 $H/D\leqslant 0.5$ 时，锻件高度对模锻力基本没有影响。

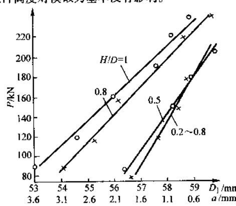


图 2.7-13 径向未充满程度与变形力的关系

图 2.7-14 为理论计算所得凹模模壁、模底和冲头端面上法向应力分布曲线。计算时，假定各接触面上的摩擦达最大值，即 $\tau_k=K$，对应的锻件参数列于表 2.7-3。

图中曲线 1 和 2 描述了锻件高径比 $\frac{H}{D}=1$ 时，法向应力随角隙充满程度而变化的分布状态，曲线 3 描述了锻件高径比 $\frac{H}{D}=0.2$ 时，法向应力随角隙充满程度而变化的状态。从曲线 1 到 2 可看出，法向应力随角隙不断充满而增大；曲线

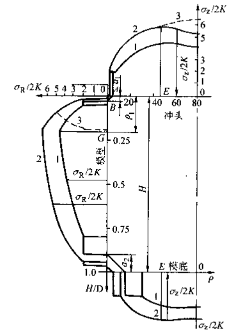


图 2.7-14　模壁上法向应力同角部充满程度的关系曲线（$\tau_k = K$）

3 显示出，模锻低锻件比模锻高锻件时作用在模壁上的法向应力有所降低，而作用在冲头端面上的法向应力有所增加。

对比图 2.7-13 和图 2.7-14 所示的曲线，可以看出，理论计算与实验两种方法所得结果是相符的。

表 2.7-3　为确定法向应力的锻件参数

$\frac{H}{D}$	$\frac{a_1}{a_2}$	a_1 /mm	a_2 /mm	$\frac{D}{a_1}$	$\frac{D}{a_2}$	$2a_1$ /mm	$2a_2$ /mm	η_1	η_2	No
1	0.25	4.000	16.00	40	10	8.00	32	0.2	0.8	1
1	0.25	1.334	5.34	120	30	2.67	10.68	0.2	0.8	2
0.2	0.75	1.330	1.78	120	90	2.67	3.56	0.085	0.115	3

（2）接触摩擦的影响

变形金属与模具间，特别是凸凹模底而与变形金属间的接触摩擦对闭式模锻力有很大影响。

当利用粗糙板（$\tau_k \approx 0.5$）镦粗时，在自由镦粗阶段，试件成鼓形，端部尺寸的增大是由于侧表而翻转的结果，如图 2.7-15a 所示；当转入闭式镦粗阶段，α_1 角除了受摩擦的影响外，还与 a 值的大小有关，如图 2.7-15d 所示。

从理论上讲，当接触摩擦 $\mu = 0$ 时，试件将整体均匀变形，侧表而在压缩过程中平行地向外扩大，如图 2.7-15b 所示。这时闭式模锻力最小，单位变形力等于材料在变形条件下的流动应力。

当接触摩擦 $0 < \mu < 0.5$ 时，端部直径的增大是由于原有直径向外扩大与侧面金属下翻同时作用的结果，如图 2.7-15c 所示。

图 2.7-16 为当接触而上的摩擦达最大和无摩擦两种条件下进行闭式镦粗所得法向应力分布曲线。两条曲线的差别表明了在凹模壁上同冲头端部一样，其法向应力随着接触摩擦的增大而增大。

（3）锻件形状的影响

据文献［3］介绍，对于表 2.7-4 中的六种不同形状的圆饼类锻件，分别用铅和 CT5 钢（加热至 1 200℃）在液压机上进行闭式模锻，所得结果分别列于表 2.7-5。

表 2.7-5 中 P_1 为工作行程开始时的模锻力；P_{max} 为工作行程终了时的模锻力；P_2 为自由镦粗过渡到闭式镦粗交界点的力；s_p 为工作行程；s_2 为相应于 P_2 的工作行程。

由表 2.7-5 所示结果可以看出：对于铅试件，形状复杂的变形力比形状简单的大，但没有超过 10%；对于在高温下的钢试件，形状复杂的同形状简单的相比，初始变形力有一定程度的增加，终锻变形力几乎没有增加。

锻件形状不仅在模锻开始阶段对变形力有影响，而且对最终模锻力也有影响。形状复杂锻件的模锻力，可比形状简单锻件的模锻力大 30% ~ 40%。

两个结果间的差别在于前者所实验的 6 种锻件形状差别不大，因而形状复杂程度对变形力的影响不明显。后者所实验的锻件形状差别大，且又是在冷态下进行的，所以形状复杂程度的影响比较明显。然而，两个文献中实验的锻件均是外径相同、形状不同、坯料的体积也不同。如果采用体积相同或接近的坯料，模锻外径相同而形状不同的锻件，通过因形状不同模锻时需转移的金属量和转移的距离的不同而导至所需模锻力的差别，可能更为确切地表达出形状复杂程度对模锻力的影响。

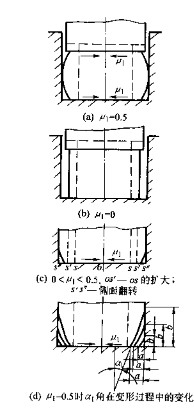


图 2.7-15　不同摩擦条件下端面的变形情况

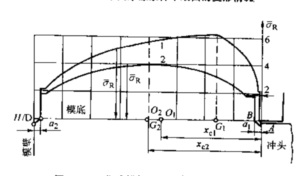


图 2.7-16　闭式模锻至模膛角隙充满时摩擦对模壁上法向应力分布的影响

1—当摩擦最大时；2—当摩擦为 0 时



表 2.7-4 圆饼类锻件的特性参数

锻件分组	锻件名称	锻件图	$\frac{D_n}{H_n}$	d (mm)	h_m (mm)	$\frac{h_m}{H_n}$
1	实心		2.9	—	—	—
2	带单向内上腔		2.7	19.1	9.3	0.5
3	带单向内下腔		2.2	—	11.6	0.52
4	带双向内腔		2.0	19.1	3.5	0.15
5	带单向外凸		2.0	21.4	15.6	0.6
6	带上外凸和内下腔		1.65	21.4	9.9	0.32

表 2.7-5 圆饼类锻件闭式模锻的结果

锻件分组	铅			钢 CT5	
	$\frac{P_1}{P_{max}}$	$\frac{P}{P_{max}}$	$\frac{s_2}{s_p}$	$\frac{P_1}{P_{max}}$	$\frac{P_2}{P_{max}}$
1	0.028	0.070	0.027	0.240	0.415
2	0.006	0.055	0.029	0.059	0.466
3	0.023	0.144	0.019	—	—
4	0.005	0.106	0.037	—	—
5	0.014	0.076	0.046	0.073	0.443
6	0.014	0.195	0.029	—	—

4.2 闭式模锻力的计算

(1) 回转体锻件精密模锻变形力的计算

对于回转体锻件精密成形，国内外普遍采用闭式模锻工艺，因此，下面仅介绍闭式模锻变形力的计算。

1) 圆柱体闭式镦粗力的计算

① 端部不出现飞边时的单位压力。设模膛下角隙最后充满，则变形区可简化为图 2.7-17 所示的半径为 ρ、厚度为 h 的球面与倾斜自由表面围成的球面体。当从变形区内切取一个单元体（图中阴影部分）时，则作用于其上的均布应力为 σ_r、σ_θ、$\sigma_\theta + d\sigma_\theta$ 及 τ。将作用于单元体上的力在 θ 方向列平衡微分方程，利用塑性条件和边界条件，积分并整理得闭式镦粗至端部尚未出现飞边时的单位压力的简化表达式：

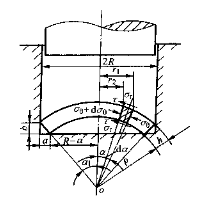


图 2.7-17 闭式镦粗变形单元体的受力情况

$$p = \sigma_s\left[1 + \frac{\alpha_1 D}{9a}\left(\frac{D}{D-a} - \frac{2a}{D}\right)\right] \tag{2.7-8}$$

式中，σ_s 为闭式镦粗变形条件下的流动应力；α_1 为变形区自由表面与凹模壁的夹角；D 为凹模工作筒直径；a 为角部径向未充满值。

② 端部出现纵向飞边时的单位压力。对于端部出现纵向飞边的闭式模锻，其变形过程与反挤相同，计算变形力时需要考虑飞边的影响。若在飞边内取一单元体，如图 2.7-18 所示，则由平衡方程、塑性条件和边界条件求出 z 向和 x 向的正应力：

$$\sigma_z = \frac{4\mu_2\sigma_s}{D-d}(z-l) \tag{2.7-9}$$

$$\sigma_x = \frac{4\mu_2\sigma_s}{D-d}(z-l) - \sigma_s \tag{2.7-10}$$

然后可导出端部出现纵向飞边时的单位变形力的简化表达式：

$$p = \sigma_s\left[1.7 + \frac{2.7\mu_2 l}{D-d} + \frac{\alpha_1 D}{4.5(D-d)}\right] \tag{2.7-11}$$

式中，μ_2 为变形金属与凸模接触面上的摩擦系数；l 为纵向飞边高度；D 为凹模直径；d 为凸模直径。

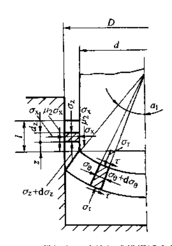


图 2.7-18 带纵向飞边的闭式模锻受力状况

③ 闭式模锻变形力的一般计算公式

a) 端部不出现纵向飞边，上角隙先充满，下角隙后充

满，或上下角隙同时充满时，其单位变形力为：

$$p = C_p\sigma_s\left[\frac{1+\alpha_1 D}{9\alpha_1}\left(\frac{D}{D-a_1}-\frac{2a_1}{D-a_2}\right)+\frac{2\ (\mu_2-0.25)}{R}\ (H-b_1-b_2)\right] \quad (2.7\text{-}12)$$

b）端部出现纵向飞边时，其单位变形力为：

$$p = C_p\sigma_s\left[1.7+\frac{2.7\mu_2\lambda}{D-d}+\frac{\alpha_1 D}{4.5\ (D-d)}\right] \quad (2.7\text{-}13)$$

式中，C_p 为锻件形状影响系数。相同变形条件下：对于简单锻件 $C_p=1$，对于形状中等复杂程度的锻件 $C_p=1.2$，对于形状复杂的锻件 $C_p=1.3\sim1.4$；σ_s 为变形条件下金属的流动应力；α_1 为后充满的下角部（或同时充满的角部）的变形自由表面与凹模壁的倾角，$\alpha_1=\mu_1\ (1.234-0.206a)$，其中 a 为未充满值；D、d 为凹模和凸模直径；a_1、a_2 为锻件下、上角部的径向未充满值，约等于锻件相应处的圆角半径（当上、下角同时充满时，取 $a_2=a_1$）；b_1、b_2 为锻件下、上角部的轴向未充满值，可由 α 和 a 计算；H 为锻件高度；μ_1 为变形金属上、下接触面间的摩擦系数；μ_2 为变形金属与凹模侧壁的摩擦系数；λ 为端部纵向飞边高度。

2）闭式镦挤力的计算。图 2.7-19 为闭式镦挤时的工作状态，所需镦挤力可按下式计算：

$$p = 4.985\times\ (1-0.001D)\ D^2\sigma_b \quad (2.7\text{-}14)$$

式中，D 为镦挤凸模直径；σ_b 为镦挤终了时金属材料的屈服强度。

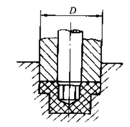


图 2.7-19 闭式镦挤工作状态图

（2）枝芽类零件精密模锻变形力的计算

采用可分凹模模锻可以成功地实现异形件的精密成形，而可分凹模模锻时金属是在闭式或半闭式状态下变形的。下面着重介绍以侧向挤压为主要变形方式的闭式模锻变形力的计算。

1）枝芽类锻件的闭式模锻力

① 分流式侧向挤压模锻。对于 T 形接头和十字轴等带枝芽类锻件，采用如图 2.7-20 所示的闭式模锻是近年来发展起来的一种新工艺，其变形方式属于分流式侧向挤压。带枝芽类锻件的侧向挤压工艺，其挤压力的理论计算比较困难，因为它既非轴对称问题，又非平面问题。然而，从近似求解的角度出发，可把冲头下面圆柱体部分的金属变形视为具有侧向挤压力的镦粗，并假定其侧面与四个（十字轴）或二个（T 形接头）水平轴颈相连；且认为冲头和金属接触面上的摩擦力达到了最大剪切应力，即 $\tau=\frac{\sigma_s}{2}$；又将每个侧枝的变形看成沿水平方向的正挤压。这个假设由十字轴金属流动的网格实验可得到验证。基于这种假设，可绘出十字轴挤压最后瞬间的示意图（图 2.7-20）。

据此分析，有关文献提出了如下计算公式：

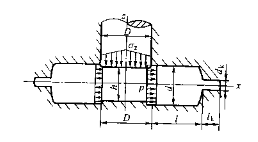


图 2.7-20 十字轴挤压终了时示意

$$p = \sigma_s\left[1+2\left(\ln\frac{d}{d_k}+2\mu\frac{\lambda_k}{d_k}+\frac{\lambda}{d}\right)+\frac{1}{6}\frac{D}{h}\right] \quad (2.7\text{-}15)$$

也可采用下面的公式计算：

$$p = \sigma_s\left(\frac{D^2}{2\sqrt{3}d^2}+\frac{4d^2}{\sqrt{3}D^2}+2\ln\frac{d}{d_k}+4\mu\frac{\lambda_k}{d_k}+\frac{2\lambda}{d}\right) \quad (2.7\text{-}16)$$

其张模力的计算公式为

$$Q = \ (F_f-F_c)\ p_0+4d\lambda_k\sigma_s \quad (2.7\text{-}17)$$

式中，F_f 为锻件的水平投影面积；F_c 为挤压筒的横截面积；p_0 为单位张模力，可取 $p_0=\ (0.8\sim1)\ p$。

由于侧向通道端部有小的排料孔，故计算 p_0 时，其系数可取小值，即取 0.8。

② 汇集式侧向挤压模锻 对于汇集式侧向挤压（图 2.7-21）可采用与分流式侧向挤压类似的分析和假设，其差别仅在于分流式侧向挤压只有一个挤压筒，而汇集式侧向挤压有两个挤压筒，即Ⅰ和Ⅱ。

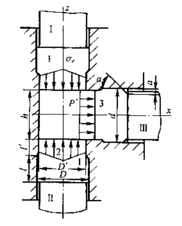


图 2.7-21 T 形接头挤压终了示意

a）当侧枝通道没有余料孔时单位挤压力的计算。当挤入侧枝通道的金属与通道底面相碰后，其变形情况相当于圆柱体闭式镦粗，所需单位变形力 p' 可按式（2.7-16）计算。而处于冲头Ⅰ或Ⅱ下面圆柱体部分的金属变形可视为具有侧压力 p' 作用的镦粗。作用在冲头Ⅰ或Ⅱ上的挤压力计算公式推导如下：

由圆柱体镦粗平衡微分方程，根据边界条件和塑性条件可得：

$$\sigma_z = \sigma_s\left\{\left[2.5+\frac{\alpha_1 d}{9a}\left(\frac{d}{d-a}-\frac{2a}{d}\right)\right]-\frac{x}{h}\right\}$$

挤压力为：

$$p = \int_0^{\frac{d}{2}}\sigma_z 2\pi x\mathrm{d}x = \int_0^{\frac{D}{2}}\sigma_s\left\{2.5+\frac{\alpha_1 d}{9a}\left(\frac{d}{d-a}-\frac{2a}{d}\right)-\frac{x}{h}\right\}2\pi x\mathrm{d}x$$



$$= \frac{\pi D^2}{4}\sigma_s\left[2.5 + \frac{\alpha_i d}{9a}\left(\frac{d}{d-a} - \frac{2a}{d}\right) - \frac{D}{3h}\right]$$

单位挤压力为：

$$p = \frac{P}{\frac{\pi}{4}D^2} = \sigma_s\left[2.5 + \frac{\alpha_i d}{9a}\left(\frac{d}{d-a} - \frac{2a}{d}\right) - \frac{D}{3h}\right] \tag{2.7-18}$$

若 $d = D$，且 $h = d = D$，则其单位挤压力为：

$$p = \sigma_s\left[2.5 + \frac{\alpha_i D}{9a}\left(\frac{D}{D-a} - \frac{2a}{D}\right) - \frac{1}{3}\right]$$

$$= \sigma_s\left[\frac{17}{6} + \frac{\alpha_i D}{9a}\left(\frac{D}{D-a} - \frac{2a}{D}\right)\right] \tag{2.7-19}$$

式中，α_i 为侧枝角部自由表面与模壁的夹角；a 为角隙径向未充满值。

b) 当侧枝通道端部开有余料孔（孔径为 d_k、长度为 λ_k），其单位挤压力为：

$$p = \sigma_s\left[1 + 2\left(\ln\frac{d}{d_k} + 2\mu\frac{\lambda_k}{d_k} + \frac{\lambda}{d}\right) + \frac{1}{6}\frac{D}{d}\right] \tag{2.7-20}$$

若 $d = D$，其单位挤压力为：

$$p = \sigma_s\left[\frac{7}{6} + 2\left(\ln\frac{d}{d_k} + 2\mu\frac{\lambda_k}{d_k} + \frac{\lambda}{d}\right)\right] \tag{2.7-21}$$

2）弯曲类锻件侧向挤压模锻

① 圆角弯曲锻件侧向挤压变形力的计算。有关文献指出，在制造 12 种典型尺寸的分叉斜角 α（图 2.7-22）为 20°、40°、60°和相对变形程度 ε 为 59%、77%和 90%ЗИ437БУ 等难变形钢和合金的喷嘴锻件时，研究了弯曲锻件侧向闭式挤模锻力。

分析表明，弯曲件侧向挤压模锻在一般情况下可分成四个阶段：Ⅰ为毛坯在挤压筒中镦粗，充满锥形部分，开始将金属挤入凹模口部；Ⅱ为金属被稳定地挤入凹模模腔的倾斜段；Ⅲ为金属被稳定地挤入凹模模腔的垂直段；Ⅳ为结束阶段。

为了分析确定侧向挤压模锻变形力 P，曾研究了金属在Ⅰ～Ⅳ段的流动条件（图 2.7-22），利用计算方法联解无限小单元体的微分平衡方程式与相应的塑性条件，即可求得侧向挤压弯曲件所需变形力的计算公式

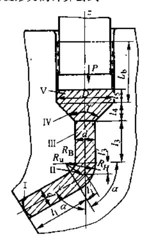


图 2.7-22 弯曲件侧向挤压示意

$$P = 2.82\sigma_s D\left\{0.44 + \ln\frac{D}{d} - 0.333 + \frac{1.235}{d}\mu\ (\lambda_1\cos\alpha - \lambda_3) + \frac{0.154}{d}\left[\frac{R_H}{R_u}\ (\sin^2\alpha + 4\sin^4\alpha)\ - 2\sin^2\alpha + 0.14R_u\sin\alpha\right]\right\}e^{\frac{2\mu\lambda_3}{D}} \tag{2.7-22}$$

式中，μ 为接触面上的摩擦系数；σ_s 为变形金属在挤压模锻终了时的流动应力。

② 直角弯曲锻件侧向挤压变形力的计算。图 2.7-23 为直角弯曲锻件侧向挤压时的滑移线场和速度矢端图。利用滑移场求得侧向挤压成形力的计算公式为：

$$P = K\left\{1.78 + 3\varphi + \frac{\varepsilon}{2} - 0.7\frac{d}{D}\left[\left(\varphi - \frac{\pi - \varepsilon}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right) + \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varphi\right)\right] + \frac{2\mu F}{D}\right\} \tag{2.7-23}$$

式中，K 为变形金属的塑性常数；φ、ε 为滑移线网中心点 a 和 b 的夹角；F 为同垂直模腔壁接触的无变形金属移动时的接触面积；μ 为摩擦系数。

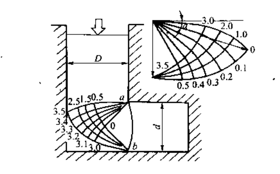


图 2.7-23 直角弯曲锻件侧向挤压时的滑移线场和速度矢端图

(3) 带肋锻件的闭式模锻力

带肋板条的肋有斜肋和矩形肋两类，肋部靠挤压成形，所以属于挤压式闭式模锻。当用主应力法求解时，可设肋的端部为自由表面，即在模膛中肋的顶端没有充满，以此作为边界条件求积分常数，进而确定模锻力。

1）带有斜肋板条的闭式模锻。设变形终了时锻件尺寸如图 2.7-24 所示。由于等断面板条长度 $L \geq$ 宽度 B，故可近似认为这是属于平面变形问题。在外力作用下，变形分为直筒部分和斜肋（楔形槽）部分，先求出楔形槽部分的单位变形力 $p_楔$，再求出整个直筒部分的平均单位变形力，而后者即为闭式模锻斜肋板条的单位变形力 p，所得计算公式为：

$$p = \frac{p_楔 A + p_c C}{B} = 2K\left[1 + \frac{1}{\alpha}\ln\frac{A}{a} + \frac{C^2}{4Bh}\right] \tag{2.7-24}$$

式中 $p_楔 = 2K\left(1 + \frac{1}{\alpha}\ln\frac{A}{a}\right)$；$p_c = K\left(1 + \frac{1}{\alpha}\ln\frac{A}{a} + \frac{C}{4h}\right)$。

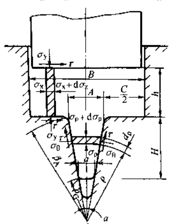


图 2.7-24 闭式模锻带斜肋板条受力情况

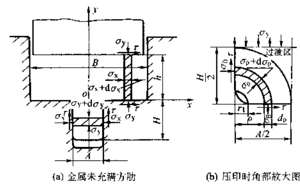
2）带方肋板条的闭式模锻。带方肋板条的闭式模锻有两种情况：金属未充满方肋底面；金属充满方肋底面，但角隙未全充满。前一种情况属于挤压式闭式模锻，后一种属于压印工艺。

① 金属未充满方肋。设变形终了时锻件尺寸如图 2.7-

25a 所示。若 σ_y 沿 A 均布，σ_x 沿 dy 均布，列基元体在方槽 y 轴方向的力平衡方程，利用塑性条件和边界条件，求得单位变形力的计算公式为：

$$p=\frac{p_c A+p_c\ (B-A)}{B}=2\mu_s\sigma_s^*\left[\frac{H}{A}+\frac{(B-A)^2}{4Bh}+\frac{B-A}{\mu_s B}\right] \tag{2.7-25}$$

式中 $$p_c=2\mu_s\sigma_s^*\left(\frac{1}{\mu_s}+\frac{H}{A}+\frac{B-A}{4h}\right)$$



(a) 金属未充满方肋　　(b) 压印时角部放大图

图 2.7-25　带方肋板条的闭式模锻

② 金属充满方肋。图 2.7-25b 所示为金属充满方槽底部但角隙未全充满时的情况，此时相当于压印。求解时需利用未完全充满时的角 r 作为边界条件求方槽内的应力分布。求得作用于冲头上的单位变形力的公式为：

$$p=2\mu_s\sigma_s^*\left\{4.5\left[1-\left(\frac{2r_1}{A}\right)^{0.1}\right]+\frac{H}{A}+\frac{B-A}{\mu_s B}+\frac{(B-A)^2}{4Bh}-0.5\right\} \tag{2.7-26}$$

当 $r_1=0$，$\mu_s=0.5$ 时，p 达最大值：

$$p_{max}=\sigma_s^*\left[4+\frac{H}{A}+\frac{2\ (B-A)}{B}+\frac{(B-A)^2}{4Bh}\right] \tag{2.7-27}$$

(4) 杯形件闭式反挤力的计算

杯形件反挤（冲孔）（图 2.7-26）成形力取决于冲头和凹模模壁附近角隙的充满程度、如果模膛封闭，即冲头和凹模间的导向部分的缝隙宽度接近于 0，那么，当设备系统为绝对刚性时，若坯料体积大于锻件体积，可能会导致模具或设备机件的破坏。但是，实际上设备的滑块系统总是要产生弹性变形的。杯形件的反挤结束时多余金属将沿着冲头与凹模的缝隙中流动，我们把这种流动称为填隙流动，所需的力叫填隙力。模膛角隙处的充满程度不同，填隙力 P 也将不同。

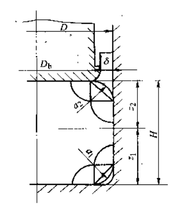


图 2.7-26　闭式反挤（冲孔）示意图

当 $2a<\delta\leqslant 4a$ 时

$$P=\frac{\pi}{2}\sigma_s\ (D+D_b)\ (\delta-2a)\ (1+a) \tag{2.7-28}$$

当 $\delta>4a$ 时，利用模膛角隙充满程度的解，得到：

$$P=2\pi\varphi_n\left(\frac{D^2-D_b^2}{\delta}-\frac{aD+aD_b}{2}\right)+2\pi c_1\left[\frac{D^2-D_b^2}{\delta}\left(\ln\frac{D-D_b}{\delta a}-1\right)+a\ (D+D_b)\right] \tag{2.7-29}$$

式中，δ 为杯形件壁厚，$\delta=\frac{D-D_b}{2}$；$a\approx\pi/4$；φ_n 为非均匀应力，$\varphi_n=2.07$；a 为角隙处变形金属形成的圆角半径或自然斜面。

对于闭式反挤或冲孔，也可采用在端部产生纵向飞边的闭式模锻时单位变形力的计算公式进行计算。

(5) 带背压作用的闭式模锻力的计算

图 2.7-27 所示为带背压装置的锻模结构，它适用于闭式模锻轮盘、凸缘类轴对称锻件。环形套筒 4、碟形弹簧 2 和支承垫板 1 构成背压装置。模锻时，坯料上多余金属反映在锻件高度尺寸的正偏差上。当模膛未充满时，背压装置没有被压缩，只有当模膛充满后，多余金属沿锻件高度方向流动而压缩背压装置。

由此可知，背压力的大小必须保证变形金属清晰地充满模膛。模锻力的大小则可利用金属塑性成形理论中的方法计算。充满模膛角隙阶段，变形金属紧贴在上冲头环形导向筒端面，塑性变形也仅发生在顶端附近的范围内，模锻力的计算则以此为基础。

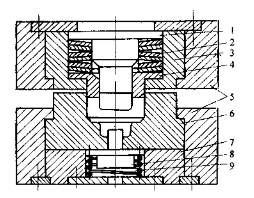


图 2.7-27　带背压装置的锻模结构

1—支承板；2—碟形弹簧；3—套筒；4—导向筒；5—模套；6—凹模；7—模座；8—顶出器；9—弹簧

1）采用圆柱形背压元件时背压力及模锻力的计算。

图 2.7-28a 为采用圆柱形背压元件时的闭式模锻简图。其背压力可采用下式计算：

$$P_b=\pi R_1^2\sigma_s M \tag{2.7-30}$$

式中，M 为作用在背压元件上的相对单位压力，它可由图 2.7-28b 所示曲线确定；也可按式（2.7-31）计算。式（2.7-31）的适用范围为 $0.01\leqslant\frac{r}{R_1}\leqslant 0.3$。

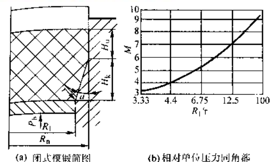
$$M=41.3\left(\frac{r}{R_1}\right)^2-31.2\frac{r}{R_1}+9.13 \tag{2.7-31}$$

式中，r 为按锻件图半径确定；σ_s 为模锻材料在给定温度速度条件下的流动应力；其他符号如图 2.7-28a 所示。

轴对称锻件（图 2.7-28a）的闭式模锻力为：

$$P=\pi R_n^2\left[M+\left(1+\frac{\mu}{\sin\ \alpha}\right)2\ln\frac{R_n}{R_1}+2\mu\frac{H_n}{R_n}\right]\sigma_s \tag{2.7-32}$$

式中，μ 为摩擦系数，$\mu=0.2\sim0.3$。



(a) 闭式模锻简图　　(b) 相对单位压力同角部充满程度间的关系曲线

图 2.7-28　采用圆柱形背压元件时的闭式模锻

2）采用环形背压元件时背压力及模锻力的计算。

图 2.7-29a 为采用环形背压元件时的闭式模锻简图。其背压力可采用下式计算：

$$P_b = \pi(R_n^2 - R_n^2)\sigma_s N \qquad (2.7\text{-}33)$$

式中　N 可由图 2.7-29b 曲线确定或由式（2.7-36）计算。式（2.7-36）的适用范围为 $0.3 \leqslant \frac{r_c}{R_2} \leqslant 0.1$。

$$N = 8.44 - 3.5\left(\frac{R_u}{R_n}\right)^2 - 1.25\frac{R_u}{R_n} + 440.5\left(\frac{r_c}{R_2}\right)^2 - 91.6\frac{r_c}{R_2} \qquad (2.7\text{-}34)$$

式中，r_c 为按锻件图上所要求的圆角半径确定。

轮盘类环形锻件（图 2.7-29a）的闭式模锻力为：

$$P = \pi R_n^2 \sigma_s \left[Q + K + N + 2\mu \frac{H_b}{R_n} \right] \qquad (2.7\text{-}35)$$

式中，Q 为按图 2.7-29c 所示曲线确定；K 为按图 2.7-29d 所示曲线确定；H_u 为模膛开启高度。

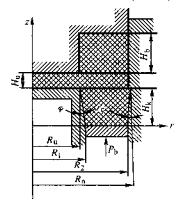
对于轮盘类齿轮锻件和环形锻件，当沿轮缘端面或环形件端面有背压力时，采用式（2.7-33）～式（2.7-35）计算所得的背压力及模锻力，其误差很小。采用式（2.7-35）计算齿轮锻件的闭式模锻力时，其 R_n 值必须以齿轮轮缘外径代入。理论计算与在实验或生产条件实测结果比较吻合，其误差不超过 10%。

（6）利用分块法计算闭式模锻力

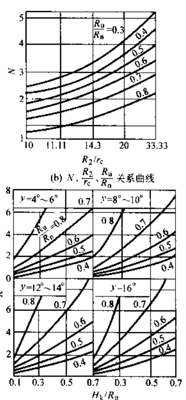
闭式模锻力除了利用上述公式计算外，还可利用分块法求解，即根据锻件的变形特点和变形区划分情况分别计算各块的变形力，然后叠加即可求得总的变形力。例如：

1）对于锻件中心部分圆角半径等于或略大于外圆角半径的变形（图 2.7-8g），模锻力等于充满角隙的力与镦粗辐板的力之和。

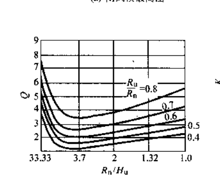
2）对于中心部分圆角半径大于外圆角半径的变形（图 2.7-8a），模锻力等于外轮缘充满角隙的力与中心部分多余金属被挤出的力（这部分挤出力与开式模锻本体部分的变形力的求法相同）两者之和。



(a) 闭式模锻简图



(b) N、$\frac{R_2}{r_c}$、$\frac{R_u}{R_n}$ 关系曲线



(c) $Q=f(\frac{R_u}{R_n},\frac{H_u}{R_n})$ 曲线　　(d) $K=f(\gamma,\frac{H_k}{R_n},\frac{R_u}{R_n})$ 曲线 $(\gamma=\alpha+\phi)$

图 2.7-29　采用环形背压元件时的闭式模锻

3）形成纵向飞边才能充满角隙时，变形力等于飞边区变形力与多余金属挤出模膛（这部分与开式模锻时本体部分变形力的求法相同）两者之和。

下面以变厚度圆形锻件（图 2.7-30）为例，说明用切块法计算其闭式模锻力的过程。

当闭式模锻该变厚度圆形锻件时，可将其划分为两部分来分析：直径为 d 的中心部分的半闭式镦粗和宽度为 $b = \frac{D-d}{2}$ 的圆环闭式镦粗。

为了确定正应力，只需确定半个轴截面上的应力分布即可。锻件圆环形部分的接触正应力可分为三个区：

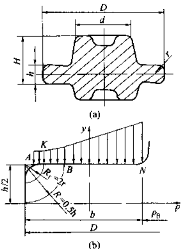


图 2.7-30 变厚度圆形件环形部分正应力图

A—*K* 区：该区宽度为 $2r$（r 为圆角半径），其正应力可近似取为

$$\sigma_{y1} \approx -2\sigma_s \quad (2.7\text{-}36a)$$

K—*B* 区：该区宽度为 $0.5h-2r$，其正应力可利用巴布科夫（A.A.Бобков）等人研究圆环闭式镦粗所得的公式确定，即

$$\sigma_{y2} = -\sigma_s\left(2+1.2\ln\frac{D-2\rho}{4.2r}\right) \quad (2.7\text{-}36b)$$

B—*N* 区：正应力分布方程可利用圆柱体镦粗的一般公式，根据边界条件求出积分常数，将积分常数代回一般公式可得：

$$\sigma_{yn} = -\sigma_s\left(\frac{\rho}{h}+1.5+\frac{D}{2h}+1.2\ln\frac{h}{4.2r}\right) \quad (2.7\text{-}36c)$$

将式（2.7-36a ~ c）作成图 2.7-30b 所示的应力分布曲线，再利用曲线所包围的体积，即可求出上述各区的变形力：

$$P_1 = \pi\left[\left(\frac{D}{2}-r\right)^2-\left(\frac{D}{2}-2r\right)^2\right]2\sigma_s = 2\pi r(D-3r)\sigma_s \quad (2.7\text{-}36d)$$

$$P_2 = 2\pi\sigma_s\left[0.15h(2D-h)\ln\frac{h}{4.2r}+0.18h(1.14D-h)-3.08r(0.28D-r)\right] \quad (2.7\text{-}36e)$$

$$P_3 = 2\pi\sigma_s\left[\frac{(D-d)^2-d^2}{2}\right]\left(\frac{4D+8h-d}{6h}+1.2\ln\frac{h}{4.2r}\right) \quad (2.7\text{-}36f)$$

若令式（2.7-36e）方括弧内的表达式为 M，式（2.7-36f）中 $2\pi\sigma_s$ 后的表达式为 A，则环形区闭式模锻所需的力为：

$$P_k = 2\pi\sigma_s[(D-3r)r+M+A] \quad (2.7\text{-}36g)$$

锻件中心部分的模锻力可按开式模锻时求本体部分变形力的方法进行计算。此时，高度为 h 的圆环相当于飞边，所以中心部分正应力公式为：

$$\sigma_y = -\frac{2K}{h_0}\rho + C \quad (2.7\text{-}36h)$$

式中 h_0 为中心部分强烈变形区高度；当 $\frac{D}{h}\leqslant 16$ 时，$h_0 = 0.15d+0.5h$；当 $\frac{D}{h}>16$ 时，$h_0 = 2.9h$。

由边界条件 $\sigma_y\left(\rho=\frac{d}{2}\right)=\sigma_{yn}\left(\rho=\frac{d}{2}\right)$，得

$$C = \sigma_s\left(1.5+\frac{D+d}{2h}+1.2\ln\frac{h}{4.2r}+\frac{0.5d}{h_0}\right)$$

将 C 代回式（2.7-36h），最后得

$$\sigma_y = \sigma_s\left(1.5+\frac{D+d}{2h}+1.2\ln\frac{h}{4.2r}+\frac{0.5d}{h_0}-\frac{\rho}{h_0}\right) \quad (2.7\text{-}36i)$$

将上式积分，即得锻件中心部分的变形力：

$$P_c = 2\pi\sigma_s\int_0^{0.5d}\sigma_y\rho\,\mathrm{d}\rho = \frac{\pi d^2}{4}\sigma_s\left[1.5+\frac{D+d}{2h}+1.2\ln\frac{h}{4.2r}+\frac{d}{6h_0}\right] \quad (2.7\text{-}37)$$

令 $\left[1.5+\frac{D+d}{2h}+1.2\ln\frac{h}{4.2r}+\frac{d}{6h_0}\right]=B$，则由式（2.7-36g）和式（2.7-37）得总的闭式模锻力：

$$P = 2\pi\sigma_s\left[(D-3r)r+M+A+\frac{d^2}{8}B\right] \quad (2.7\text{-}38)$$

5 闭式模锻工艺的制订

5.1 锻件的工艺性分析

锻件的工艺性分析，主要考虑锻件的用料、几何形状、尺寸精度和表面质量、生产批量及设备条件等，下面分别简要说明。

1）锻件材料。凡是采用开式精密模锻方法能锻造的任何合金材料，都可以进行闭式精密模锻，一些塑性较差的材料采用闭式模锻更为有利。

一般模锻用铝合金、镁合金等轻金属和有色合金，因为模锻温度低，不易产生氧化，模具磨损小且锻件表面粗糙度低等，故适宜于采用闭式模锻。

钢质锻件的闭式模锻比轻合金和有色金属困难。因为在低温下钢的变形抗力大，对模具的强度和耐磨性要求较高。因此，通常采用热态闭式模锻，但要求模具有较高的红硬性和抗热疲劳性能等。

2）锻件形状。如齿轮坯、轴承、突缘等旋转体锻件最适合于整体凹模闭式模锻。形状复杂的锻件，只要模锻时能从闭式凹模模膛中取出，就可采用整体凹模闭式模锻，若不能采用整体凹模闭式模锻，可采用可分凹模闭式模锻。所有旋转体锻件和部分形状复杂的锻件还可进行闭式模锻。从几何形状的角度考虑，能进行闭式模锻的锻件已列于表 2.7-2 中。

3）锻件尺寸精度和表面质量。在闭式模锻的工艺分析和模具设计中，应考虑上述影响锻件精度的诸因素，进行具体分析计算，以确定锻件的尺寸精度。但是，由于影响因素比较复杂，使得理论上不易准确地计算。实际上，如能在生产中严格控制各因素，则锻件的尺寸精度约比模膛精度低 2 级。表面粗糙度则取决于毛坯加热时的氧化程度、模膛的表面粗糙度、模锻时的冷却和润滑以及锻件的冷却条件等。通常，闭式模锻件的表面粗糙度为 $Ra12.5\sim6.3\ \mu m$。

5.2 锻件图的制订

（1）确定分模面

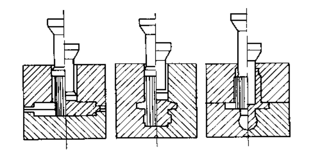
确定闭式精密模锻件分模面的原则，与开式精密模锻相同，应考虑模膛易于充满、锻件能从模膛中取出和便于模具加工等。在闭式精密模锻中，毛坯金属在凸凹模构成的封闭模腔中变形。锻件形状越复杂，金属流动越困难，因此，应尽可能造成以镦粗或挤压或两者复合的方式成形。对于整体凹模闭式精密模锻，分模面应选择在锻件与冲头（凸模）接触的端面上；对于复杂锻件的可分凹模模锻，其可分凹模分模面的选择与开式模锻完全相同。根据锻件的形状特点，分模面有三种基本形式，即水平分模、垂直分模和混合式分模（图 2.7-31）。对于一些中空或多孔零件，可采用多向闭式模锻，其凹模的分块和冲头的个数常在两块和一个以上，即有多个分模面。

分模面的位置与模锻方法直接有关，而且它决定着锻件

内部金属纤维的流线方向。金属纤维流线方向对锻件性能有较大影响。合理的锻件设计应使最大载荷方向与流线方向一致。若锻件的主要工作应力是多向的，则应设法造成与其相适应的多向流线。为此，必须将锻件材料的各向异性（即纵向、横向和宽度方向的性能）与零件外形联系起来，选择恰当的分模面，以保证锻件内部的金属纤维方向与主要工作应力方向一致。

（2）机械加工余量和公差

即使采用可分凹模闭式模锻，锻件上总会有些不便模锻成形的部分（如小孔和某些凹槽等）。凡不便模锻成形的部分，可以加上敷料，以简化锻件的形状。锻件上凡是尺寸精度和表面质量达不到产品零件图要求的地方，锻后需进行机械加工，这些地方应根据加工方法的要求预留加工余量。其余量和公差的大小根据锻件重量、加工精度要求和形状复杂系数确定。



(a) 分平分模　　(b) 垂直分模　　(c) 混合分模

图 2.7-31　可分凹模的基本型式

（3）模锻斜度

当模具中没有顶出装置时，锻件应给出模锻斜度，以保证顺利脱模。此时闭式模锻与普通模锻一样，若锻件材料为铝、镁合金时，外模锻斜度分别为 3°～5°和 1°～3°，内模锻斜度分别为 5°～7°和 3°～5°；若锻件材料为钢、钛、耐热合金时，外模锻斜度分别为 5°～7°和 3°～5°，内模锻斜度分别为 7°、10°、12°和 5°、7°、9°。模锻斜度公差值为 ± 30′或 ± 1°。

模具中设有顶出装置时，可以不设模锻斜度或只设很小的模锻斜度，如 30′或 1°。

（4）圆角半径

锻件的圆角半径直接影响着模锻时的金属流动、模膛充满、模锻力、模具磨损、切削加工余量和锻件转角处的流线切断等。

闭式精密模锻件内外圆角半径的确定与开式精密模锻件的相同。其外圆角半径和内圆角半径分别为

$$r = 余量 + a$$

$$R = (2\sim3)\ r$$

式中，a 为零件上相应处的圆角半径或倒角。

表 2.7-6 和表 2.7-7 为有关文献建议的允许最小圆角半径。

5.3　模锻工序及锻坯的设计

对于一般闭式模锻由变形程度确定模锻工序，以温挤或热挤压变形的闭式模锻为例，最大变形程度取决于毛坯的塑性和模具所能承受的压力。同时，为了获得具有良好力学性能的挤压件，保证零件有合适的晶粒组织，变形程度应大于临界变形程度，通常就是大于最小变形程度。

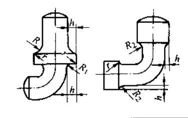
表 2.7-6　闭式模锻件的最小圆角半径

mm

锻件高度 H	正常级模锻件		较高级模锻件	
	R_1 和 R_2	R_3、R_4 和 R_5	R_1 和 R_2	R_3、R_4 和 R_5
5 以下	0.5～0.8	0.4～0.8	0.4～0.8	0.3～0.5
5～10	1.0～1.5	0.8～1.0	0.8～1.0	0.5～0.6
10～15	1.5～2.5	1.0～2.0	1.0～2.0	0.8～1.0
15～25	2.5～3.0	2.0～2.5	2.0～2.5	1.5～2.0
25～40	3.0～4.0	2.5～3.0	2.5～3.0	2.0～2.5
40～80	4.0～5.0	3.0～4.0	3.0～4.0	2.5～3.0

表 2.7-7　锻件难充满部位的最小圆角半径

mm



h	R	R_1	R_2	r
3 以下	5	2.5	1.5	1.0
3～5	8	4	2.5	1.0
5～10	10	5	4	1.5
10～15	12	8	5	1.5

一般用断面缩减率表示挤压变形程度，即

$$\varepsilon_F = \frac{F_0 - F_1}{F_0}$$

式中，F_0 为毛坯截面积；F_1 为挤出件截面积。

枝芽类零件闭式精密模锻（以挤压方式成形）时其变形程度可用成形系数的倒数表示，即

$$\varepsilon_F = \frac{1}{\lambda} = \frac{\Sigma F_b}{F_c}$$

式中，ΣF_b 为锻件各枝芽或叉形部分横截面面积之和；F_c 为原毛坯横截面积。

对于碳钢和合金结构钢，热挤压的最大变形程度可达 90%以上。临界变形程度约为 20%左右，所以最小挤压变形程度一般应大于 20%。

温度范围低于 700～800℃的中温挤压，考虑到模具寿命，各种钢的变形程度，建议采用：

1Cr18Ni9Ti、W9Cr4V2、Cr23Ni18 等钢，$\varepsilon_F \leqslant 60\%$；

1Cr13、GCr15、T8、T12、30CrMnSi 等钢，$\varepsilon_F \leqslant 65\% \sim 70\%$；

35、45、40Cr、40CrNi、45Cr、50 等钢，$\varepsilon_F \leqslant 70\% \sim 75\%$；

10、15、20、20Cr、20Mn 等钢，$\varepsilon_F \leqslant 80\% \sim 85\%$。

挤压模锻时，挤压次数和工序间尺寸是根据允许变形的挤压变形程度来确定。



5.4 主要的辅助工序及特点

(1) 毛坯的清理

清除毛坯表面氧化皮的方法，常用的有酸洗、干法滚筒清理、车削或无心磨削等。

干法滚筒清理，是在转动的滚筒中（一般滚筒直径为500～600 mm，转速为30～50 r/min），利用毛坯的互相碰撞和锯木屑等与毛坯的摩擦作用，使氧化皮脱落。通常，毛坯与锯木屑装入量的体积比为4:1～6:1，总装载量约占滚筒容积的3/4。滚筒清理成本低；能全部清除表面的氧化皮，毛坯的棱角被磨钝，有利于模锻。

如需同时清除毛坯表面的氧化皮和脱碳层，则需采用车削或无心磨削剥去毛坯表皮。但车削和磨削成本较高，只有当少无氧化加热能保证锻件的脱碳深度要求和锻件主要部分不必再经切削加工时，才采用这两种清理方法。

对于一般闭式模锻件，也可采用普通加热方法加热毛坯，然后把高温毛坯浸入冷水中，使氧化皮爆裂而脱落；也可选用预镦工序，将加热好的毛坯，通过预镦使氧化皮脱落，再进入模锻工序；也可用滚动的钢丝刷子或刮板清理毛坯表面的氧化皮。

(2) 锻件的清理

闭式模锻件的清理包括两项内容：一是切掉飞边；二是清理氧化皮。闭式模锻件，往往在分模面上带有一定宽度的薄飞边，这对后续切削加工十分不利，必须采用类似于板料冲裁模的切边模切掉。清除锻件氧化皮的方法，一般采用酸洗、干法滚筒清理、湿法滚筒清理、喷砂或喷丸等。

干法滚筒清理会引起锻件变形，特别是细长和薄壁件容易变形和碰伤。干法清理后的锻件，一般需进行校正。

湿法滚筒清理是在滚筒内用液体和磨料组成的研磨剂与锻件一起滚动而清理锻件表面的氧化皮。湿法清理的锻件表面非常光洁，相当于研磨，而且成本不高。与干法滚筒清理相似，清理时锻件会发生变形和尖角被磨钝。

采用喷砂和喷丸清理，可避免锻件变形，还能提高锻件表面的硬度，一般在0.3 mm的深度内硬度可提高30%～40%。

对于较重要的锻件，要用酸洗清理。酸洗的优点是不会使锻件变形，并能显露锻件表面裂纹。但酸洗废液是有害物质，会造成环境污染，所以，必须对酸洗废液进行净化处理，以保护环境。

各种常用清理方法的比较和应用范围见表2.7-8。

表2.7-8 毛坯和锻件氧化皮的清理方法

方法名称	优点	缺点	应用范围
酸洗	大量的；保持毛坯或锻件原有尺寸和形状；可发现表面缺陷	劳动条件不好，废液会污染环境	毛料和锻件；不受锻件形状和重量的限制
干法滚筒清理	大量的；成本低	毛坯或锻件的棱角磨钝；锻件可能变形	主要用于毛坯的清理。亦可用于锻件的清理。毛坯质量一般小于6 kg
湿法滚筒清理	大量的；表面粗糙度相当于研磨；成本不高	锻件棱角磨钝（相当于 $r\leq1.5$ mm），锻件可能发生变形	用于锻件的清理。若零件尺寸精度不高于7级，可作锻件最后加工用；锻件质量一般小于6 kg
喷砂、喷丸	大量的；保持毛坯或锻件原有尺寸	成本较高	主要用于锻件的清理，锻件重量不限
车削	能同时除去氧化皮和表面脱碳层	生产率低；材料利用率低；成本较高	用于直径较大的毛坯，要求除去脱碳层的表面清理
无心磨削	能同时除去氧化皮和表面脱碳层	成本高	用于较小直径的毛坯，要求除去脱碳层的表面清理
冷水浸、镦粗	成本低	清除氧化皮不十分完全	用于加热后毛坯氧化皮的清理

(3) 锻件的冷却和防氧化

目前的精密模锻，尤其是闭式精密模锻件，无论是中小型的还是大型的，多为一次模锻成形，模锻结束后锻件温度往往还在1 000℃左右，甚至更高。所以，锻件的冷却与普通模锻件的不同之处，主要是防止锻件在冷却过程中发生氧化。因此，应在保护介质中冷却。通常采用如下三种冷却方法：

1) 一般是把锻件放入干燥的细砂中冷却，在批量生产中是把锻件有次序地分放在有格子的砂箱中。

2) 当需要缓慢冷却时，可把锻件放在热砂箱或石棉粉中冷却。

3) 对于小型精密锻件，为了更有效地保护锻件，可在保护气氛的装置中冷却。

(4) 精密模锻时的润滑

精密模锻无论是开式还是闭式，模锻时接触面上的单位压力一般在800～1 200 MPa，有的甚至高达2 500 MPa，温度一般在1 150～1 200℃。在如此高的压力和温度下，润滑膜的建立是非常困难的。模锻时变形金属与模膛表面间的摩擦，将使模膛表面磨损，增大金属的流动阻力并造成脱模困难。所以，必须采用和研制专门的润滑剂及润滑方法以改善模锻条件。

在生产中一些常用的热锻润滑剂列于表2.7-9。

表2.7-9 热锻润滑剂配方（质量分数） %

润滑剂成分	使用方法	锻件材料
石墨水悬浮液	A、B	钢、铁
石墨 + 机油 50%	A、B	钢
MoS_2 粉剂 15% + 铝粉 5%～10% + 胶体石墨 20%～30% + 炮油余量	A	碳钢、不锈钢、耐热钢
石墨 3% + 食盐 10% + 水 87%	A	钢
银色石墨 34% + 亚硫酸盐纸浆溶液 34% + 水	A	钢



续表 2.7-9

润滑剂成分	使用方法	锻件材料
碳酸锂 28% + 甲酸锂 14% + 胶体石墨 25% + 水 28% + 次生烃基硫酸盐 5%	A	耐热钢
$ZnSO_4$49.5% 与 KCl50.5%共溶物 + $K_2CrO_4$2.3%	A	钛及钛合金
氧化硼	A	钛及钛合金
C-9 玻璃①50% + 苏州黏土 3%~5% + 水 40%外加水玻璃 5%	C（另用润滑剂喷涂模膛）	碳钢、不锈钢、耐热钢
豆油磷脂 + 滑石粉 + 38 号汽缸油 + 石墨粉微量	B	铜和黄铜
机油 95% + 石墨粉 5%	B	铜和黄铜
机油 + 松香 + 石墨 30%~40%	A、B	铝、镁及其合金

① C—9 玻璃成分（质量分数）：$SiO_2$43.2%，$Al_2O_3$0.9%，BaO43.8%，CaO3.9%，ZnO5.1%，MoO3.1%。
注：A—喷涂于模具上；B—喷涂于热坯料上；C—加热前喷涂于毛坯上。

实际应用表明，石墨水悬浮液（即水剂石墨）的润滑效果比较理想，故目前在各种热态成形中应用比较广泛。

这种润滑剂的固体物质主要是石墨和无机盐类。虽然石墨在高温（>540℃）下由于氧化速度的加快而使润滑性能显著下降，但可以通过与一些无机盐类的组合来提高石墨的高温润滑性能。无机盐在这种润滑剂中主要是起脱模、高温粘结和湿润作用。

6 闭式锻模设计

闭式模锻模具设计时，应根据锻件图、工艺参数、金属流动分析、变形力和功的计算、设备参数和模锻过程中模具的受力情况等，逐一考虑模具整体结构；模具工作零件的结构、材料、硬度和强度核算；从模膛中迅速取出锻件的方法；多余金属分流腔的位置、形状和尺寸的确定；零件设计包括加工精度、表面粗糙度、热处理要求和技术条件等。下面仅就锻模设计中的一些特性问题进行论述。

6.1 模具的类型

闭式模锻模具的分类通常有两种：一种是按模锻设备分类；一种是按凹模结构分类。

1）按模锻设备分类，如锤用锻模、螺旋压力机用锻模、机械压力机用锻模、液压机用锻模和高速锤用锻模等。

2）按凹模结构分类，可以分为整体凹模和可分凹模两种结构。

整体凹模适合于饼类件如齿轮坯、螺母及杯筒类零件，高度尺寸不大的阶梯轴、螺栓、铆钉、偏心轴，杯杆类零件等的闭式模锻。

可分凹模主要用于管接头、阀体、三销轴、十字轴、万向节叉等枝叉类和多孔类复杂零件的闭式模锻。

对于复杂零件精密成形，尤其是异形枝叉类零件精密模锻，国外自 20 世纪 70 年代初起研究适合于各种通用模锻设备使用的可分凹模模具，国内自“六五”以来大力开展了这方面的研究。

一些典型的可分凹模结构及工作原理如图 2.7-32 所示。可分凹模结构设计的关键在于凹模的闭合与张开机构。对于水平可分凹模，其闭合与张开机构有三种不同的型式：一是利用设备工作台下面已有的气垫或液压缸；二是在模具上设置弹簧或玻璃纤维酚醛塑料等弹性元件产生压紧力与张开力；三是利用楔块机构，偏心轴或括弧楔等刚性夹紧机构。对于垂直可分凹模主要有圆锥或楔块成四连杆等通过模座或连杆产生的水平反力使其闭合夹紧。

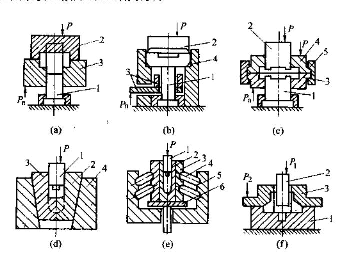


图 2.7-32 一些典型的可分凹模结构及工作原理图
(a) 1—下冲头；2—上凹模；3—下凹模 (b) 1—下冲头；2—上冲头；3—浮动模底；4—固定凹模
(c) 1—下冲头；2—上冲头；3—下半凹模；4—上半凹模；5—刚性夹 (d) 1—上冲头；2—右半凹模；3—左半凹模；4—凹模圈
(e) 1—上冲头；2—凹模镶块；3—模底；4—连杆；5—模座；6—托板 (f) 1—下凹模；2—冲头；3—上凹模



6.2 分流降压腔的设计

如前所述，由于各种因素的影响，很难使坯料体积与闭式模膛的容积刚好相等。为解决这一问题，可采取两条有效措施：一是提高下料精度，保证坯料体积的波动小；二是在模具上设置工艺补偿空间，即多余金属分流腔，像开式模锻一样，当模膛充满后多余金属被挤入分流腔。带有分流腔的闭式模锻实际上就是半闭式模锻，可降低模膛内部压力，有利于提高模具寿命。这虽然使模锻时仍有一定的飞边金属损耗，但比开式模锻时飞边金属损耗要小得多，重要的是设置了分流腔之后，使闭式模锻的适用范围大为扩展，因此，可以说这是闭式模锻工艺的一大进步。

（1）分流腔的设置原则

分流腔的设置原则，即分流腔应设置在什么位置最合理。应遵循的原则就是前面所说的多余金属分流腔应满足的要求。

1）当模膛中所有难于充满的部位在未充满之前，变形金属不应当被挤入到分流腔，这就是说分流腔的位置应选择在模膛最后充满的部位。

2）多余金属挤入分流腔时不应当伴随变形阻力的提高，即多余金属分流时在模膛内所产生的压力比模膛刚充满时所产生的压力没有增加或增加很小，以免增加总的模锻力和加快模膛的磨损。

此外，从便于切掉所产生的小飞边的角度考虑，侧向分流器应设置与锻件最大横向投影面积对应的模膛（沿分模面）周围。

具体设计时，一般依靠合适的尺寸关系来满足第一个要求；以合理的金属流动方向来满足第二个要求。

（2）减小模膛工作压力的设想和依据

通常，模锻时的工作压力包括材料的理想变形抗力、摩擦阻力和多余功阻力三部分。其中，理想变形抗力可用下式表示：

$$p_i = y_m \ln\left(\frac{R}{1-R}\right)$$

式中，y_m 为锻件材料的名义流动应力；R 为变形强度。即相对面积缩减率。

由图 2.7-33 所示曲线可以看出，工作压力 p_m 随面积缩减率 R 的增加而增加，当 $R=1$ 时，p_m 增至无限大。R 由图 2.7-34 确定，挤压时 R 值为常数。开式模锻时，由于工件自由表面的减小而 R 值增大，因此，如果能控制 R 值的增加就可减少工作压力。

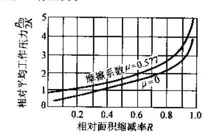


图 2.7-33 相对面积缩减率 R 对挤压力 p_m 的影响

在毛坯上预留分流孔。如图 2.7-35 所示，在工件受压面的中心部分有一根轴，工作后移开，此轴给变形金属一流动的减压口。此外，运用分流抑制了断面缩减率和图 2.7-36 中摩擦值的上升。这同样能对成形过程起较大的压入作用，对改善外轮廓的充填性具有同样的效果。

图 2.7-37 是基于这个道理而提出的减压孔原理；即在毛坯中心加工一减压孔，当冲头压下时，通过减压孔的收缩（图 2.7-37a）或形成减压轴（图 2.7-37b）产生向心流动以实现分流。

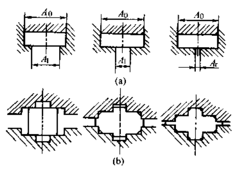


图 2.7-34 相对面积缩减率 R 的概念

(a) 挤压（相对面积缩减率：$R=(A_0-A_1)/A_0$，A_0 为试样截面积；A_1 为产品截面积）

(b) 模锻（相对面积缩减率：$R'=(A-F)/A$，F 为自由表面积；$(A-F)$ 为与模具接触的面积；A 为总的表面积

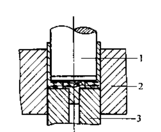


图 2.7-35 轴向减压原理

1—凸模；2—挤压筒；3—顶出器

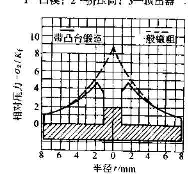


图 2.7-36 带凸台锻造和一般锻造的应力分布比较

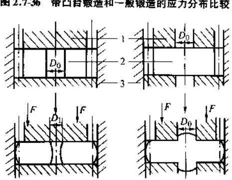


图 2.7-37 利用分流原理的锻造过程

1—冲头；2—毛坯；3—挤压筒



(3) 分流腔的结构型式及设计计算

分流腔有不同的结构型式，除图 2.7-35 和图 2.7-37 所示减少轴和减压孔外，还有侧向缝隙式、纵向缝隙式、中心孔式和窗框式等。到底采用哪种型式取决于锻件的结构性能和所采用的工艺方案等。如果是轴对称锻件，当为盘类锻件时，一般采用环形侧向缝隙式分流器，且设置在锻件高度的中部；当为直齿圆柱齿轮精密模锻时，则应采用中心孔或分流柱的方式分流，如此等等，下面列举几种予以说明。

1）孔式分流腔。如图 2.7-38 所示，孔式分流腔适用于带有中心孔的圆盘类锻件的闭式模锻。这种分流腔结构简单，其位置设在终锻模冲孔凸台的中心部位。当锻件的孔径 $d\geqslant 50$ mm时，分流孔分设在上模和下模，图 2.7-38 即为这种情况；当锻件的孔径 $d=40\sim50$ mm 时，分流孔完全设在下模。

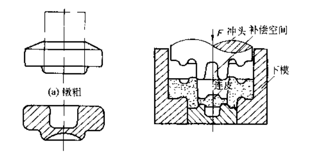


图 2.7-38 孔式分流腔

可以看出，孔式分流腔的结构与开式模锻中带仓连皮的内飞边槽相似。因此，设计时，分流腔桥部的宽度、高度和过渡处圆角半径均可按带仓连皮桥部对应的尺寸选择，而对应于仓部的分流空间则按如下原则确定：

$$V_d \geqslant V_b - V_f$$

式中，V_d 为分流腔空间容积，为仓部与桥部空间容积之和；V_b 为坯料体积，按坯料长度和截面尺寸的上偏差计算；V_f 为锻件体积，按各公称尺寸的下值差计算。

当锻件中心带有凸起或不长的杆部时，则在凹模上对应的孔形型腔可适当加深，以此作为自然的多余金属分流腔，还可降低模膛内的压力值。当锻件直径与中心孔径之比较大时，将变形金属挤入中心孔所需的力会增大，这会引起模具产生较大的弹性变形，进而导致锻件出现端部飞边。如果所采用的中心孔分流腔使得模膛直径与中心孔径之比具有最小值，那么变形阻力将减小，当变形金属清晰地充满模膛时，锻件端部可能不会产生飞边。这样，由多余金属在中心分流孔由形成的枝芽长度不长，脱模时容易从孔中退出。设计时还应预留容纳附加金属体积的空间，保证多余金属全部流入中心孔分流腔时也不至引起模膛内压力的增高。

实践表明，对于阶梯齿轮或具有小台阶的法兰的闭式模锻，当 $\dfrac{D}{D_p}$（D 为锻件直径；D_p 为中心孔直径）$=1.2\sim4.5$ 时，可得到很好的效果。在这种情况下，可在凹模的中心孔中装设弹性推出机构，当多余金属流入孔中时将弹簧压缩，其阻力增大，模锻结束后，靠弹簧的伸张力将锻件推出。

中心孔式分流腔的直径等于锻件中心凸台或杆部直径，而深度必须大于凸台或杆的长度，具体按下式确定：

$$\Delta L=\frac{4\Delta V}{\pi d_p^2}+(10\sim15)\ \text{mm}$$

式中，ΔL 为由于锻件体积同坯料体积不一致而导至凸台或杆长的变化值，mm；ΔV 为多余金属体积，mm^3。

10～15 mm 为顶出装置顶部至最大长度的凸台或杆长端面间的附加距离

例 已知一齿轮锻件直径 $D=140$ mm，圆角半径为 3 mm，轮缘高 25 mm，凸台直径65 mm，在新的模具中模锻时多余金属体积为 216 mm^3，试确定中心孔式分流腔的尺寸。

首先确定中心分流孔直径，因锻件带有中心凸台，故分流孔直径应与凸台直径相等，取 65 mm 的孔径。然后确定分流孔的深度，由上式得

$$\Delta L=\frac{4\times26\ 100}{\pi\times65^2}\ \text{mm}+(10\sim15)\ \text{mm}$$
$$=17.9\sim22.9\ \text{mm}$$

取孔深为 20 mm。

2）环形侧向分流腔。如图 2.7-39 所示，有两种结构型式：一种由桥部和仓部所组成；另一种仅为宽度尺寸较大的桥部而无仓部。可见，与开式模锻对应结构型式的飞边槽相似，只不过是相应的尺寸都小一些而已。其主要尺寸是分流腔的外圆半径 D_2 和同模膛连接处的圆角半径 r_H。

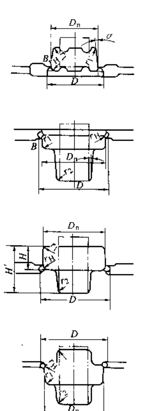


图 2.7-39 环形侧向分流腔的结构型式

根据两条必须遵循的原则、坯料尺寸精度和闭式模锻的特点，分流腔的两个主要尺寸 r_H 和 D_2 分别计算如下：

$$r_H\leqslant\frac{\left(\dfrac{D_n}{6}-\dfrac{0.05d_2^3}{D_1^2}\right)r_1}{\dfrac{D_n}{6}-\dfrac{0.05d_2^3}{D_1^2}+4\mu A\dfrac{D_n}{D_1^2}(H-2r_1)\ r_1}\tag{2.7-39}$$

式中，r_H 为分流腔圆角半径，mm；H 为锻件高度，mm；r_1 为模膛（对应于锻件最大外圆）圆角半径，mm；D_1 为毛坯金属与模底接触的圆周直径，$D_1=D_n-\sqrt{2}rA$；D_n 为模腔或锻件直径，mm；d_2 为金属水平流动而积对应的圆周直径，

当 $H < D_{H}$ 时，通常取 $d_2 = D_n - H'$；H' 为锻件在高度方向上的最大尺寸，mm；r 为由于拉应力所形成的圆角半径，mm；A 为金属流动表面形成的系数，$A = \sqrt{2} \sim 0.83$。

$$D_2 = \sqrt{\frac{d_H}{r_H}\left[2L(\Delta_1 + \Delta_2) + d_H(\Delta L_1 + \Delta L_2)\right] + D_n^2} + (10 \sim 20)\ \text{mm} \tag{2.7-40}$$

式中，D_2 为分流腔外径，mm；d_H 为坯料的公称直径，mm；L 为坯料的公称长度，mm；Δ_1、Δ_2 为坯料直径的负和正偏差，mm；ΔL_1、ΔL_2 为坯料长度的负和正偏差，mm。

根据对轴对称锻件闭式模锻成形过程的实验研究和理论分析，得到模膛内各圆角被金属充满时和多余金属被挤入侧向环形分流腔形成小飞边时变形抗力的计算公式。

对于模膛内各圆角被金属充满即整个模膛被充满时，其所需变形力的计算又分两种情况考虑，即

当 $H \geqslant D_n$（高锻件）时

$$F_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}\sigma_s\left[\frac{D_n}{6Ar} + \frac{\sqrt{2}}{3} + \left(1 - \frac{0.83}{2A}\right)\cos\alpha\right] \tag{2.7-41}$$

当 $H < D_n$（低锻件）时

$$F_1 = \frac{\pi D_1^2}{4}\sigma_s\left[\frac{D_n}{6Ar} + \frac{\sqrt{2}}{3} + \left(1 - \frac{0.83}{2A}\right)\cos\alpha\right] - \frac{\pi d_2^2}{4}\sigma_s\frac{0.415 d_2}{6Ar\sqrt{2}} \tag{2.7-42}$$

式中，F_1 为变形力，N；D_1 为毛坯金属同模底接触的圆周直径，mm，与锻件直径的关系为 $D_1 = D_n - rA\sqrt{2}$；D_n 为模膛或锻件直径，mm；r 为由于拉应力所形成的圆角半径，mm；α 为靠近模底停滞区侧表面形成的斜度，通常取 $\alpha = 45°$；σ_s 为锻造温度下坯料金属的屈服点，MPa。

式（2.7-41）和式（2.7-42）中有关尺寸符号如图 2.7-40 所示。

对于模膛充满后多余金属被挤入环形分流腔形成小飞边时，其变形力可按式（2.7-43）计算：

$$F_2 = \frac{\pi D_n^2}{4}\sigma_s\left[\frac{D_n}{6Ar_H} + \frac{2}{3A} + \left(1 - \frac{0.83}{2A}\right)\cos\alpha + \gamma\ln\frac{D}{D_n}\right] - 0.05\sigma_s\frac{\pi d_2^3}{4Ar_H} \tag{2.7-43}$$

式中尺寸符号见图 2.7-40，D 为小飞边外径，$\gamma = 1.1$。

分析式（2.7-43）可知，随着小飞边外径 D 的增大，会导至变形阻力 F_2 的增大。然而对于较为精确的坯料尺寸即允许的尺寸偏差范围，增量 $\gamma\ln\frac{D}{D_n}$ 的值不大。因此，作为侧向缝隙式的环形分流腔在接收被挤入的多余金属时，可使总的变形阻力 F_2 没有明显的增加，可相当好地满足第二条原则。

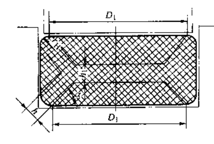


图 2.7-40 轴对称锻件闭式模锻角部充满时金属流动特性

下面以图 2.7-41 所示闭式模锻为例，计算其所需环形分流器的尺寸，并检验是否满足第二条原则。

图示锻件的原毛坯尺寸为 $d_H = 60^{+0.5}_{-1.1}$ mm，$L = (114 \pm 1.0)$ mm；由图示尺寸可看出：$r_1 = 3$ mm；$d_2 = D_n - H' = 110 - 44$ mm $= 66$ mm；$H = 34$ mm；$D_1 = D_n - 2r_1 = 110 - 6$ mm $= 104$ mm（假设 $A = \sqrt{2}$）。假设 $\mu = 0.5$，将已知数据代入式（2.7-39），得

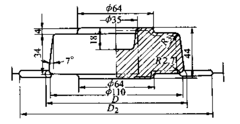


图 2.7-41 闭式模锻件

$$r_H = \left(\frac{110}{6} - \frac{0.05 \times 66^3}{104^2}\right) \times 3 / \left[\frac{110}{6} - \frac{0.05 \times 66^3}{104^2} + 4 \times 0.5\sqrt{2}\frac{110}{104^2} \times (34 - 6) \times 3\right]\ \text{mm} = 2.7\ \text{mm}$$

对应的侧向小飞边由式（2.7-42），得

$$D = \sqrt{\frac{60}{2.7}(228 \times 1.6 + 60 \times 2) + 110^2}\ \text{mm} = 152\ \text{mm}$$

则分流腔外径为

$$D_2 = D + 10\ \text{mm} = 152\ \text{mm} + 10\ \text{mm} = 162\ \text{mm}$$

下面核算变形阻力。A 取平均值，即 $A = \frac{\sqrt{2} + 0.83}{2} = 1.12$；假定终锻温度 $t = 800℃$，对应的金属屈服点为 $\sigma_s = 60$ N/mm²。当形成半径 $r = r_H = 2.7$ mm 时，$D_1 = D_n - \sqrt{2}Ar = 106$ mm，按式（2.7-44）计算变形阻力，即

$$F_1 = \frac{\pi \times 106^2}{4} \times 60 \times \left[\frac{110}{6 \times 2.7 \times 1.12} + \frac{\sqrt{2}}{3} + \left(1 - \frac{0.83}{2 \times 1.12}\right)\frac{\sqrt{2}}{2}\right]\text{kN} - \frac{\pi \times 66^2}{4} \times 60 \times \frac{0.415 \times 66}{6 \times 1.12 \times 2.7\sqrt{2}}\ \text{kN} = 3\,469\ \text{kN}$$

当最大的多余金属形成最大的小飞边时，按式（2.7-43）计算其变形阻力，得

$$F_2 = \frac{\pi \times 110^2}{4} \times 60 \times \left[\frac{110}{6 \times 2.7 \times 1.12} + \frac{2}{3 \times 1.12} + \left(1 - \frac{0.83}{2 \times 1.12}\right)\frac{\sqrt{2}}{2} + 1.1\ln\frac{152}{162}\right]\ \text{kN} - 0.05 \times 60 \times \frac{\pi \times 66^3}{4 \times 1.12 \times 2.7}\ \text{kN} = 3\,767\ \text{kN}$$

两者之差等于 298 kN，这个差值仅为模膛充满时变形力的 8%。可见，形成小飞边时变形力没有明显的增加，这说明所设计的环形分流腔的尺寸是合理的。

对于圆盘类锻件的锻模，其逢隙式环形分流腔设在锻件高度的中部，则分流腔的宽度也可按容纳最大体积的多余金属来确定，即

$$b_x = \frac{D_H - D_n}{2} + (5 \sim 10)\ \text{mm} = \sqrt{\frac{D_n^2}{4} + \frac{\Delta V}{\pi t}} - \frac{D_n}{2} + (5 \sim 10)\ \text{mm}$$

式中，D_H 为飞边外径，mm；D_n 为锻件外径，mm；ΔV 为多余金属体积，mm³；t 为飞边厚度，mm。

3）热挤压带法兰实心锻件端部环形分流腔。这种分流腔的结构如图 2.7-42 所示，可以看出它与上述侧向环形分流腔的结构相似，其区别在于前者适用于闭式镦粗工艺，而本分流腔适合于齿轮、联轴器和法兰类实心零件热态闭式挤压成形工艺，其原理也是在变形结束时毛坯上多余金属被挤入环形分流腔。实际经验表明，分流腔的尺寸应保证既要使模膛易于充满又要使模具具有经济合理的寿命，而经济合理



的寿命又决定于多余金属挤入分流腔时所产生的流动阻力。经试验确定，当多余金属在具有高度的分流腔中流动时其流动阻力不超过充满模膛所需压力的7%。由此可见，高度 h 值是高度固定缝隙式分流腔的关键结构参数。

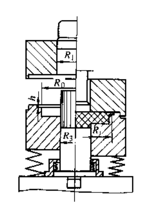


图 2.7-42 带分流腔的横向可分凹模

图2.7-43所示挤压变形力 p 同分流腔缝高与实际飞边半径之比的关系曲线。表2.7-10所列为与曲线对应的实验数据。图2.7-44为锻件法兰半径相对值 R_0/R_1 与 h/R_1 间的关系曲线。由实验得到过横坐标上 $\frac{h}{R_1}$ = 0.110、0.121、0.140、0.168的点作垂线与曲线相交，这些交点对应的纵坐标点 $\frac{R_0}{R_1}$ = 1.25、1.5、1.75、2.0。按这些点确定的参数，模具寿命可达到最高。

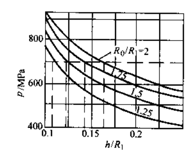


图 2.7-43 $p-\frac{h}{R_1}$ 关系曲线

表 2.7-10 图 2.7-43 曲线的实验数据

法兰半径 R_0 / 工作筒半径 R_1	压力/MPa							
	压力 p 当 h/R_1				张模力 q 当 h/R_1			
	0.1	0.15	0.2	0.25	0.1	0.15	0.2	0.25
1.25	760	555	450	410	350	120	10	0
1.5	820	620	535	490	480	260	155	90
1.75	870	685	620	540	590	375	270	220
2.0	925	730	650	595	625	420	335	290

由图2.7-44可看出，随着 $\frac{R_0}{R_1}$ 增加，缝高 h 与工作筒半径 R_1 之比也增大。根据单位变形力的波动不超过7%的范围，可得到缝高与工作筒半径 R_0 的近似关系为

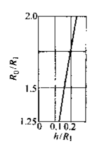


图 2.7-44 $\frac{R_0}{R_1}-\frac{h}{R_1}$ 曲线

$$h=0.082R_0 \tag{2.7-44}$$

设转移到分流腔中的多余金属体积为 V_k，由实验确定 V_k 的计算公式如下：

$$V_k=2\pi R_0^2 h\ln\frac{R_i}{R_0} \tag{2.7-45}$$

因分流腔外半径 R_i 很少影响到多余金属在分流腔中的流动阻力，它的大小可取（1.1～1.15）R_0，代入式（2.7-45）后得 $\ln\frac{R_i}{R_0}\approx 0.12$，得

$$V_k=0.75R_0^2 h \tag{2.7-46}$$

将式（2.7-44）代入式（2.7-46），得

$$V_k=0.06R_0^3 \tag{2.7-47}$$

按式（2.7-47）得到的体积大约小于原毛坯上多余金属体积的2倍。

按上述各式确定的分流腔尺寸为最佳尺寸。

4）纵向分流腔。如图2.7-45所示，分流腔与锻件轴线平行，也是由桥部和仓部所组成。这种分流腔结构参数主要有余料仓数量 n；桥部长度 a、宽度 b 和仓部直径 d。

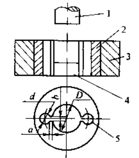


图 2.7-45 轴对称锻件纵向分流腔的设置

1—凸模；2—凹模；3—模套；4—模垫；5—余料仓

根据锻件结构特点，n 可取1、2、4，采取对称分布，便于锻后切去飞边。桥部的长与宽同锻件直径或横截面积的大小相关，一般取 a =（0.15～0.20）D，b =（0.05～0.10）D，但 a 尽量取小值，b 尽量取大值。考虑到单仓时至少能容纳坯料总体积5%的余料（对热轧棒料），按中等剪切精度下料时，当坯料长径比为0.5～2时，坯料体积相对偏差 $\frac{\Delta V}{V}$ = ±（2%～5%），故按 $b(d+a)>\frac{0.05\pi D^2}{4}$ 选取料仓直径 d。

分流腔结构参数对单位成形力的影响如图2.7-46所示。图示曲线为在 a 与 b 不变的条件下，单位变形力 p、桥部相对高度 c（即锻件高径比）和余料仓的数量 n 之间的关系。由图可见，当 c 值由0.25增加到0.75时，p 值降低约10%；当 n 由1增加到4时，p 值约降低15%。

$$b=0.1D$$

$$a=1.5d$$

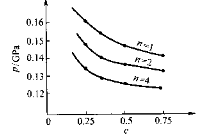


图 2.7-46 p、c、n 关系曲线

5）带背压装置的浮动模膛。对于图 2.7-47 所示旋转体零件的闭式模锻，利用背压装置作半封闭端，让锻件的高度尺寸 H_1 可以变化，以调节坯料体积的变化，这样可以防止由于坯料体积过大而造成模膛压力过高和设备过载。背压装置还可以作为顶出锻件的装置。在这种情况下，在锻件上所能获得的最小外圆角半径 R_c 与平均单位压力 p 的关系如图 2.7-48 所示，其数学表达式为

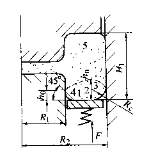


图 2.7-47 带背压装置的可分凹模闭式模锻示意图
1、2、3、4—塑性变形区；5—刚性区；
h_n—塑性变形区的高度

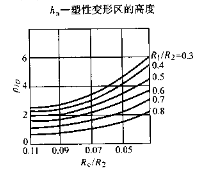


图 2.7-48 图 2.7-47 所示闭式模锻时的平均单位压力$\frac{p}{\sigma}$与$\frac{R_1}{R_2}$、$\frac{R_c}{R_2}$的关系曲线

$$p=\sigma_s\left(8.44-3.5\frac{R_1^2}{R_2^2}-1.25\frac{R_1}{R_2}+440.48\frac{R_c^2}{R_2^2}-91.55\frac{R_c}{R_2}\right)$$

为了获得某一圆角半径 R_c 所需背压装置的总背压力为

$$F=pA_n=\sigma_s A_n\left(8.44-3.5\frac{R_1^2}{R_2^2}-1.25\frac{R_1}{R_2}+440.48\frac{R_c^2}{R_2^2}-91.55\frac{R_c}{R_2}\right)$$

式中，p 为平均单位背压压力，MPa；F 为总背压压力，N；σ_s 为在锻造变形温度和变形速度条件下金属材料的屈服点，MPa；R_1 为锻件环形孔的半径，mm；R_2 为锻件外圆角半径，mm；R_c 为锻件环形部分的外圆角半径，mm。

6）端部轴向分流孔。对于带枝芽类的锻件，可在枝芽模膛的端部开一轴向分流孔，图 2.7-21 所示为十字轴和 T 形接头闭式侧向分流挤压成形工艺，当模膛充满之后，坯料上多余金属从 4 个（T 形接头只需 2 个）端部的分流孔中挤出形成小的圆柱形枝芽，模锻结束后，将小枝芽去掉。因十字轴和 T 形接头端部模膛是最后充满的部位，故分流孔设置在枝芽模膛的端部是符合第一条原则的。

经实验研究表明，当十字轴或 T 形接头锻件本体上无难于充满的凸台时，合适的分流孔尺寸（即满足第二条原则）取决于枝芽模膛的结构特征，通常取

$$\frac{d_k}{d}=0.35\sim0.4$$

式中，d_k 为分流孔直径；d 为锻件枝芽部分或枝芽模膛直径。

当枝芽锻件本体上有圆形或方形凸台时，尤其是凸台截面尺寸越小，d_k 相对于 d 的尺寸应越小，对于不同的锻件结构可通过实验确定。

7）端部侧向分流孔。图 2.7-67 所示传动轴万向联轴器叉内侧的凸起（虚线）表示叉形模膛相应部位内侧上的凹坑，即为分流孔（或工艺调节空间）。叉形件采用闭式分流挤压成形工艺时，叉形耳朵内侧是最后充满的部位，分流空间的大小取决于坯料的精度，其原则是分流空间必须略大于坯料体积的最大偏差值，而具体尺寸则按多余金属分流时不至导致模膛内部压力有明显增大来确定。

8）端部角隙。对于某些锻件的闭式模锻，可在锻件需要加放切削加工余量的端部模膛上预留工艺补偿间隙即分流空间。如图 2.7-49 所示，三通管接头闭式模锻时，将工艺补偿空间留在旁通的端部，这种形式的分流空间称作端部角隙。在设计模具时，使冲头Ⅲ与旁通型腔构成的封闭腔长度比锻件旁通的长度尺寸略长。模锻时，坯料体积的波动反映在锻件旁通端部周边圆角半径大小的变化上。其设计依据是保证锻件旁通端部形成的最大圆角半径在预留的切削加工余量所允许的范围内。

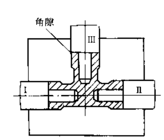


图 2.7-49 三通管接头可分凹模闭式模锻

9）轴向环形储料槽。图 2.7-50 所示为小外筒垂直可分凹模闭式冲孔（反挤压）工艺。储料槽设计在靠近模膛上端，因闭式冲孔时模膛上端是最后充满的部位，其结构仍是由桥部和仓部组成。设置储料槽后，多余金属通过桥部挤入料仓，不至沿冲头与凹模间的端部间隙形成薄而长的纵向飞边，这样可防止张模力的过大增长，也可减少模具的磨损。

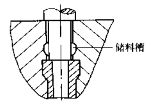


图 2.7-50 储料模示意图

6.3 可分凹模模具设计要点及设计方法与步骤

（1）设计要点

与整体凹模相比，除有利于变形金属的流动、便于取出



锻件等共同点外，可分凹模的设计还须注意如下要点。

1）在凹模上必须设置分流腔或工艺补偿空间。在机械压力机上进行闭式模锻时，因压力机滑块工作行程固定，仅靠机身和模具的弹性变形即弹性退让，不可能满足坯料体积波动的要求，必须在模具上主要是在凹模上设置分流腔或工艺补偿空间。即使在行程不固定的螺旋压力机或液压机上进行闭式模锻，为了保证锻件高度尺寸的精确，必须对滑块工作行程严格地限位，因此，也应在凹模上设置分流空间，以便起到调节作用。

2）可分凹模的夹紧力必须大于或等于模锻时变形金属在分模面上产生的张模力，防止变形金属流入分模面而形成飞边。

3）模锻时，模具的动作顺序应是先使可分凹模闭合并夹紧，然后冲头挤压坯料而模锻成形；模锻结束后，冲头首先退出复位，然后，可分凹模张开。

4）对于需要两个或两个以上冲头的多向闭式模锻，当要求坯料由冲头自动对中定位时，首先使接触坯料的两个冲头同步动作；当不能使坯料自动对中定位时，应在凹模中设有定位基准，避免在模锻时因坯料没有对中定位而发生一端充不满另一端有多余金属而产生飞边。

5）在满足工艺要求的前提下，模具结构力求简单可靠，便于操作，易于清除模膛中的氧化皮和润滑剂残渣。

6）模架上的运动副及凸、凹模工作部分尽量采用镶块结构，以便磨损或损坏后更换。

（2）设计方法与步骤

1）按精密锻件计算其体积的大小 V_f，根据锻件的几何形状及尺寸与变形方式确定坯料的直径 D_0，然后根据 $\pi D_0^2 H_0/4 = V_f$，计算出坯料的长度 $H_0 = 4V_f/\pi D_0^2$。

2）根据锻件的高度尺寸 h_0 确定变形行程 S（$S = H_0 - h_0$），S 值即为闭合的整体凹模相对固定凸模压缩坯料的行程，同时也是确定凸模长度的依据。

3）计算径向挤压或形力 F，一般可采用理论计算公式、实验测试，也可按如下经验公式计算：

$$F = \frac{\pi D^2}{4} p$$

式中，p 为单位挤压力，D 为冲头（凸模）直径。

挤压力 F 是校核凸模强度和选择挤压设备的依据。

4）计算张模力 Q

$$Q = (A_f - \pi D^2/4)\ q + 4 d_k l_k \sigma_s$$

式中，A_f 为锻件的水平投影面积；q 为单位张模力，$q = (0.8 \sim 1)\ 4F/\pi D^2$。

凹模夹紧力即合模力应当大于或等于张模力。进而可对合模机构进行设计和计算。

对于圆柱形弹簧合模机构，根据合模力、压力机允许的模具轮廓尺寸和变形行程，可以选择或计算出弹簧的数量、刚度及全部结构参数。

对于碟形弹簧合模机构，根据合模力及变形行程，可以设计或选择碟簧的刚度、对数和全部结构参数。

对于液压（或气压）合模机构，根据合模力、变形行程及压力机工作台下（或上面）允许的空间尺寸，计算和选择液（气）压和液压缸的全部结构尺寸。

对于图2.7-86所示刚性合模机构，根据合模力计算括弧楔的强度和刚度，确定截面形状及尺寸；根据变形行程和凹模的尺寸及重量计算和选择凹模的支承弹簧的数量、刚度及全部结构参数。

5）模腔的设计，凹模模腔按精密锻件图确定其形状和尺寸，为了排出多余金属和降低模腔内部压力，应根据模腔（锻件）形状特点及变形方式，在合适的位置开设分流腔。

导向装置及模具封闭高度的设计计算方法与一般锻模相同。

此外，对于连杆括弧楔合模机构（图2.7-104），曲柄肘杆式合模机构及多组楔块式合模机构等机械式合模机构，须对可分凹模的闭合、张开与合模机构的夹紧、松开两种运动进行运动关系及轨迹分析，以确保两种运动协调的准确性。

7 闭式模锻设备

闭式模锻设备可分为通用闭式模锻设备和专用闭式模锻设备。可用作闭式模锻的通用设备有模锻锤、螺旋压力机和机械压力机（包括热模锻压力机和一般曲柄压力机），这些设备在有关章节均已介绍过，在此不再赘述。

目前，国内外主要采用的专用闭式模锻设备有：双动热模锻压力机、中小型多向闭式模锻压力机。下面简要介绍这两种专用压力机的结构及工作特点，便于工艺上的选用和模具设计。

7.1 双动热模锻压力机

（1）结构特点及工作原理

双动压力机分机械传动和液压传动两种型式。目前制造的双动曲柄压力机主要用于薄板拉延工序，而制造的双动热模锻压力机并形成系列化生产的仅有俄罗斯的沃龙涅什重机公司。

图2.7-51为沃龙涅什重机公司制造的双动曲柄热模锻压力机的传动系统。安装在轴承2上的偏心轴1通过连杆6带动内滑块5，而两个连杆3（上端与偏心轴1相连）通过杠杆系统7、8、9和拉杆10带动外滑块4运动。

该压力机与模具的装配关系如图2.7-52a所示，图中8为与图2.7-51中4所示的外滑块，9为内滑块（图2.7-51中的5）。10为冲头，11、14分别为上、下模座，12、13分别为上、下两半凹模。上半凹模12固定在上模座11上，下半凹模13固定在下模座14上。上模座固定在外滑块8上，冲头固定在内滑块上，下模座固定在工作台上。

模锻时，首先将加热好的棒料毛坯置于下半凹模13的模膛中，开动压力机内、外滑块下行，外滑块将两半凹模闭合压紧，然后内滑块通过冲头施压使毛坯变形充满模膛，模锻结束时，内滑块首先回程带动冲头从锻件中退出，然后外滑块回程并带动上半凹模张开，顶出器将锻件从下半凹模中顶出，取走锻件，即完成一个工作循环。

图2.7-52为5 000/5 000 kN双动热模锻压力机组，其模锻生产过程的顺序为：在感应加热器3中加热好的毛坯沿滑道2供给接收器4以便定位，自动夹钳5将接收器4中的毛坯放入下半凹中，模锻结束后，当锻件被顶出时，夹钳4将其抛入滑道6中。

双动曲柄热模锻压力机系列及参数列于表2.7-11。

（2）设备吨位的选择

对于双动压力机吨位的选择必须同时根据锻件的模锻或形力和可分凹模的合模力来选择内、外滑块的压力。其原则是使成形力小于或等于内滑块的公称压力，合模力（即张模力）小于或等于外滑块的公称压力。

1）一般计算公式 成形力的计算可分下面两种情况：

① 在分模面上的投影为圆形的锻件

$$F = 8\ (1 - 0.001D)\ \left(1.1 + \frac{20}{D}\right)^2 \sigma_b A$$

② 在分模面上的投影为非圆的锻件

$$F = 8\ (1 - 0.001D)\ \left(1.1 + \frac{20}{D'}\right)^2 \left(1 + 0.1\sqrt{\frac{L}{B_m}}\right) \sigma_b A$$

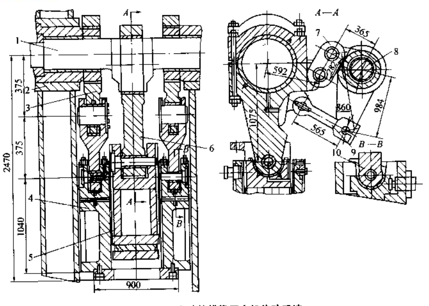


图 2.7-51　双动热模锻压力机传动系统

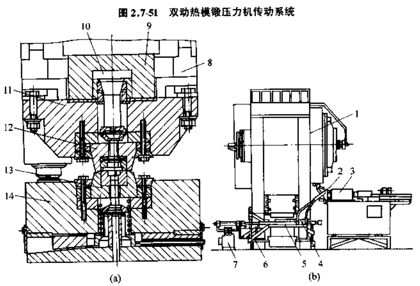


图 2.7-52　双动热模锻压力机及其机组

表 2.7-11　双动曲柄热/模锻压力机技术参数

参数	单位	5 000/5 000	8 000/8 000	12 500/12 500
总压力	kN	10 000	160 000	
内滑块压力	kN	5 000	8 000	12 500
外滑块压力	kN	5 000	8 000	12 500
滑块行程次数	min^{-1}	40	40	32
内滑块行程	mm	250	320	350
外滑块行程	mm	250	260	300
内滑块闭合高度	mm	970	1 330	1 500
外滑块闭合高度	mm	970	1 080	1 200
滑块调节距离	mm	10	10	10
工作台尺寸（左右×前后）	mm	1 000×1 000	1 400×1 300	1 500×1 400
内滑块尺寸（左右×前后）	mm	520×500	670×560	800×630
外滑块尺寸（左右×前后）	mm	900×800	1 500×1 220	1 700×1 400
下顶出器顶出力	kN	250	150	250
下顶出器顶出行程	mm	80	80	100
电机功率	kW	90	90	110
机器总质量	kg	64 400	160 000	250 000

式中，D 为锻件直径；D' 为折算直径，$D'=1.13\sqrt{A}$；L 为锻件在投影面积上的最大外廓尺寸；B_m 为锻件在投影面积上的平均宽度，$B_m=F/L$；σ_b 为终锻温度下金属材料的抗拉强度；A 为锻件在分模面上的投影面积。

而合模力可按下式计算：

$$Q=pA$$

式中，p 为闭式模锻时的单位压力，可取变形金属作用于凸模上单位流动压力的 0.9～1.1 倍；A 为锻件在凹模分模面上的投影面积。

2）对于枝芽类锻件，采用图 2.7-20a 所示可分凹模结构的模具进行模锻时，其挤压力 p 即作用在内滑块上的力可利用式（2.7-15）或式（2.7-16）计算；

其张模力的计算公式为

$$Q=(A_f-A_0)\ p_0+4dl_k\sigma_s$$

式中，A_f 为锻件的水平投影面积；A_0 为挤压筒的横截面积；p_0 为单位张模力，可取 $p_0=(0.8\sim1)\ p$。

公式中的尺寸符号见图 2.7-20。

对于图 2.7-69 所示圆锥或斜面自锁式垂直可分凹模模锻，其成形力可根据锻件形状特点及变形方式选择合适的经验公式或理论公式进行计算。

模锻时凹模压紧圈受力状况如图 2.7-53 所示。F_1 为挤压模锻时产生的水平分力即垂直可分凹模的张模力，则作用于凹模压紧圈斜面上的垂直（法向）和平行（切向）分力分别为

$$F'=F_1\cos\alpha$$

$$F''=F_1\sin\alpha$$

对于凹模压紧圈所产生的垂直方向的作用力为

$$F'''=F'\cos\alpha$$

$$=F_1\sin\alpha\cos\alpha$$

使两半可分凹模严密地贴合为一体的条件：

$$F\geqslant F_1\sin\alpha\cos\alpha$$

图 2.7-53　凹模压紧圈受力情况

7.2　中小件专用多向闭式模锻压力机

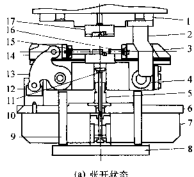
（1）水平分模的多向模锻机械压力机

有关文献介绍了一台用于压制黄铜管接头、气旋塞体和龙头阀体等的多向模锻专用压力机，其结构如图 2.7-54 所示。这台专用压力机包括三个主要部分：上部、下部和中部。上部固定在压力机滑块上，它由上底板 1、上半凹模 17 和折线形仿形板 2 组成，后两者固定在前者上。下部由底板 6 和工作台 7 组成。可动底板 4 通过支承杆 9 支承在托板 8 上，而托板 8 支承在气垫或油缸活塞上，下半凹模、冲头夹持器 3、14 和钟锤杠杆 13 均与可动底板 4 相连，钟锤杠杆与支座 10 铰接，支座 10 固定在底板 6 上，这些零件相互连接构成中间部分。

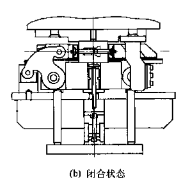
图 2.7-54a 所示为压力机滑块处于上死点时的情况。当滑块下行时，首先使两半凹模闭合，且折线形仿形板在下行时将右边冲头夹持器推向左边滑动而使右冲头 16 移动到预定位置，随着滑块继续下行，可动底板 4 使与其铰接的钟锤杠杆 13 绕着支座 12 向右旋转，从而迫使左夹持器 14 向右滑动，左冲头 15 将坯料挤压成形，图 2.7-54b 为模锻结束时的状态。

下夹持器 5 固定于底板 6 上，其上既可安装下冲头也可安装顶出器 11，具体视需要而定。

（2）垂直分模的多向模锻机械压力机



(a) 张开状态



(b) 闭合状态

图 2.7-54　水平分模多向模锻专用压力机

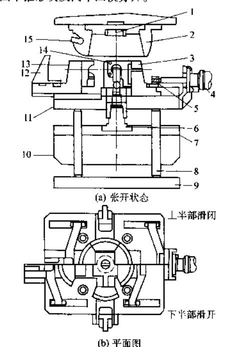
这种压力机常用于生产比较复杂的中空锻件，例如闸阀壳、水量计壳及三通管等，在一个方向上需要极大的成形力。

垂直分模的多向模锻压力机，其结构如图 2.7-55 所示。基本结构包括三个主要部分：固定于压力机滑块上的上部，固定于工作台上的下部和可动的中间部分。

上部的主要零件有钟形锥 2、脱模块（或上冲头）1。下部由工作台 10、底板 7 和下冲头夹持器 6 组成，下冲头通过螺母固定在夹持器 6 上。底板 11 通过推杆 8 支承在托板 9 上，托板 9 与气垫或油缸活塞相连，后（或固定）锥 3、主锥 13 与底板 11 相连并可在底板上滑动，杠杆装置 5 与气缸 4 的活塞杆连接，气缸 4 通过支架固定在底板 11 上，滑动仿形板 12 与主锥 13 固定为一体，两半垂直可分凹模中的一半固定在后（或固定）锥 3 上，另一半固定在主锥 13 上，在底板 11 上还有前、后两个边锥，主锥 13 及两个边锥均通过杠杆装置 5 与气缸 4 相连，这些相关的零件一起构成可动的中间部分。

当压力机滑块处在上止点时，模具及其附属机构的状态如图 2.7-55a 和 b 的下半部所示。此时可使气缸通过杠杆装置使四个锥形块合拢从而使两半凹模闭合，将加热好的坯料置于凹模模膛中支承在下冲头的顶端。当滑块下行时，钟形锥将四个已合拢的锥形块紧紧地压在一起，整个中间部分随着滑块与钟形锥一起下行，下冲头迫使坯料变形而得到所需锻件 。图 2.7-56 为模锻结束时的状态。当压力机滑块回程时，中间部分在气垫的作用下随之上升，将锻件从固定的下冲头上退出。当中间部分上升至上限位置后就停止不动，而滑块继续上升时，钟形锥上的弹键 15 就打击滑块仿形板 12，

以利于闭合的凹模张开，当滑块回至上死点，就起动气缸工作，将四个锥形块及两半凹模分开。



(a) 张开状态

(b) 平面图

图 2.7-55 垂直分模多向模锻专用压力机

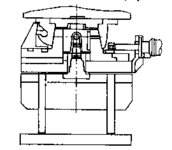


图 2.7-56 垂直分模多向模锻压力机闭合状态

如果钟形锥内装有上冲头，那么在钟形锥离开四个（滑动）锥形块上移时，冲头会从锻件中退出，但一般不这么使用。

(3) 自动化综合体

俄罗斯于 1985 年研制出型号为 AKK0830 和 KB2132 型自动化综合体。自动化综合体由坯料接收器、定位机构、感应加热、毛坯供给和专用曲柄压力机组成。专用曲柄压力机可实现双冲头（上、下冲头）对向模锻。

其中 AKK0830 自动化综合体的主要技术性能参数如下：

生产率/（件/h）　600 ~ 900

坯料尺寸

（直径/mm × 长度/mm）　(15 ~ 30) × (48 ~ 80)

加热功率/kW　100

公称压力/kN

每个变形滑块　1 000

凹模压紧力　1 000

凹模开启高度/mm　150

凹模闭合时冲

头变形行程/mm　50

顶出力/kN　50

顶出行程/mm

上面的　50

下面的　70

四个侧滑块（调节用）

中每个滑块的力/kN　10 ~ 50

主传动电机功率/kW　32

压力机轮廓尺寸

（长/mm × 宽/mm × 高/mm）　1 800 × 1 900 × 4 300

压力机质量/t　23.4

该自动化综合体用于模锻气焊装置上的黄铜锻件。

在纵向可分凹模中由 2 和 3 个冲头（图 2.7-57）模锻弯头和三通及阀体类锻件。成形过程分为两个阶段：第一阶段，由主冲头将坯料金属挤入侧枝腔；第二阶段，由侧冲头进行终锻成形。凹模和冲头寿命为 4 000 ~ 10 000 件。

专门用于模锻三通的自动化综合体 KB2132 的主要技术性能参数如下：

三个滑块中每一滑块的公称力/kN　350

最大行程/mm：

每个主滑块的　100

侧滑块的　20

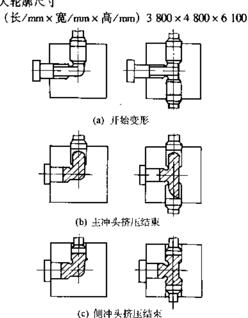
公称压紧力/kN　1 200

半凹模开启高度/mm　150

最大生产率/（件/min）　10

最大轮廓尺寸

（长/mm × 宽/mm × 高/mm）　3 800 × 4 800 × 6 100



(a) 开始变形

(b) 主冲头挤压结束

(c) 侧冲头挤压结束

图 2.7-57 自动化综合体上二和三冲头纵向分模系统

8 闭式模锻实例

8.1 模锻锤上整体凹模闭式模锻

(1) 齿轮闭式模锻（图 2.7-58）

图 2.7-58 为在模锻锤上闭式模锻齿轮坯锻件所采用的锻模。所用原毛坯直径 ϕ85 mm，加热后，直立于下模 ϕ89 mm的凹坑中，开始轻击定位，然后重击成形。

(2) 齿轮锻件成形镦粗制坯闭式模锻成形（图 2.7-59）

图 2.7-59 所示为采用成形镦粗闭式模锻齿轮锻件。选用直径为 ϕ80 mm 的棒料（模膛中定位凹坑直径为 ϕ82 mm），第一工步为成形镦粗，成形镦粗即闭式镦粗，这样较为有利于充满（挤入）模膛中 ϕ70 mm 的深孔部分，且坯料的长径比也不会太大；第二工步也是成形镦粗，第一工步后将毛坯倒转 180°，用 ϕ70 mm 的一端定位成形另一端，并使该端锻至最终尺寸，再将毛坯倒转 180°进行闭式终锻成形。

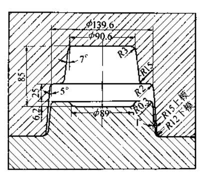


图 2.7-58 齿轮坯闭式模锻

由此可以看出，每一道工步要保证下道工步准确定位，上一工步已成形的部分，在下一工步中不变形或少变形。

（3）轮盘类齿轮锻件的闭式锻模（图 2.7-60）

如图 2.7-60 所示，轮盘类齿轮闭式模锻工艺过程为镦粗、模锻和切除飞边三个工步组成。模锻成形时在锻件下端面周围变形金属首先形成厚为 2 mm、宽为 8 mm 的横向飞边，然后再沿凸凹模间的间隙形成纵向飞边。这一圈薄的横向飞边相当于开式模锻件的飞边桥部，模锻后可利用切边模将飞边切掉。

这种改进，仅增加少量金属材料的消耗，但可切除飞边，保证锻件质量，消除了纵向飞边对后续切削加工的影响，不再靠手工清除飞边，大大提高锻件清理的效率，使得锤上闭式模锻工艺得以更广泛的应用。

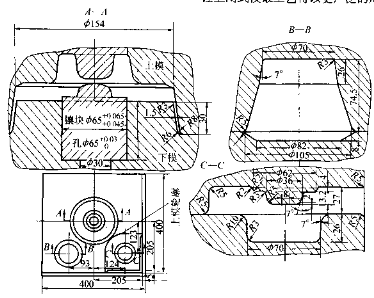


图 2.7-59 齿轮坯成形闭式镦粗与闭式模锻

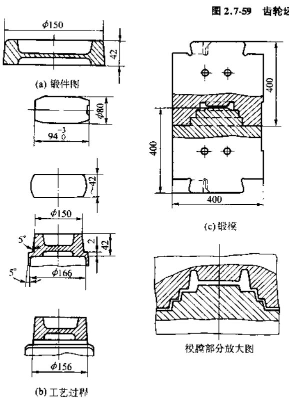


图 2.7-60 轮盘类齿轮的闭式锻模

8.2 螺旋压力机上整体凹模闭式模锻

（1）螺旋压力机上闭式模锻成形的特点

对于轮盘类和凸缘类锻件，在螺旋压力机上均可采用闭式模锻。对于形状比较简单的实心件，具有小孔、厚壁的环形件，可采用坯料直接在终锻模膛模锻成形（图 2.7-61a）。对于形状比较复杂、特别是带孔、小凸台的锻件，为便于成形并防止产生夹层，必须采用预镦工步（图 2.7-61b），预镦毛坯直径 $D_p = D_f -$（3～5）mm，D_f 为锻件直径。对于形状特别复杂的锻件，还要采用定型预锻工步（图 2.7-61c）。

应该指出，由于螺旋压力机打击速度较模锻锤的低，坯料易冷却，故其成形能力较差。为此，应尽量选择以镦粗为主的变形方式。在选择毛坯直径时，应尽量按锻件凸起部分作为坯料直径，即 $d_0 = d'_0 -$（1～2）mm。

此外，在工艺和模具设计方面还应注意如下两点：

1）由于螺旋压力机上可以安装顶出器，故锻件的模锻斜度可以取得较小或不取斜度。

2）螺旋压力机的打击速度比较低，且最大打击力受到限制，所以模具的承击面可以取得比模锻锤的小，通常可取为与模锻锤对应的承击面积的$\frac{1}{3}$。

（2）齿轮锻件整体凹模闭式模锻（图 2.7-62）

该例所示为一种螺旋压力机用闭式模锻的锻模结构。凹模模膛置于下模，采用镶块模芯，这样有利于坯料的定位和更换凹模中易于磨损的芯部。这种模具结构，其特点是双向导锁导向，使闭式模膛在变形力增大时，可以有较大的弹性



变形、从而可以靠少量地改变锻件外径尺寸来调节坯料及模膛新旧容积不等导致的变化（ΔV），同时靠锻模的承击面保证锻件最小高度尺寸。这种双向导锁，原则上也适用于锤上闭式模锻锻模。

(3) 齿轮坯无飞边模锻

据文献介绍，模锻图 2.7-63a 所示直齿圆柱齿轮坯，当其直径在 170 ~ 300 mm 之间，可在 10 000 kN 摩擦压力上进行无飞边模锻。

1）齿轮坯锻件图的制订

① 一般齿轮坯表面加工粗糙度 R_a 为 12.5 ~ 3.2 μm，加工余量为 1.5 ~ 2.5 mm；加工粗糙度 R_a 在 1.6 μm 以上者增加余量 0.25 ~ 0.5 mm。

② 锻件高度偏差为 $^{+2.2}_{-1.0}$ mm，内孔偏差为 ± 1 mm。

③ 锻件与上模对应的模锻斜度取 3°，与下模对应的模锻斜度取 5°；与模套间的斜度取 0.5°。

④ 锻件的冷缩率取 1.5%。

2）模锻工艺。对于直径小于 200 mm 的齿轮坯不需镦粗制坯，可直接对坯料进行终锻；对于直径较大的齿轮锻件，

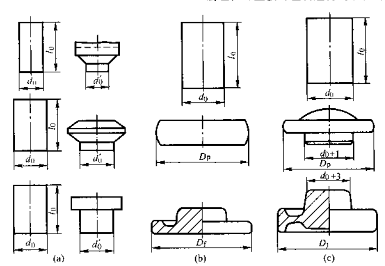


图 2.7-61 轮盘、凸缘类锻件闭式模锻过程

制坯工艺关系到齿轮能否成功的关键。为保证齿轮轮毂处的金属能够充满，经镦粗后的毛坯高度 H_f（mm）用下面经验公式计算：

$$H_1 = \frac{V_c}{\pi\left(\frac{D_B}{2}\right)^2}$$

式中，V_c 为齿轮轮毂体积，mm³；D_B 为轮毂直径，mm。

此外，因无飞边模锻是金属在封闭的模膛内挤压成形，变形金属在上模膛内的变形属于反向挤压，在下模膛内属于正挤压。因此，应将轮毂较高的一端置于下模。

3）模具结构。在 10 000 kN 摩擦压力机上进行无飞边模锻，采用压圈紧固形式的组合结构。其特点是当模锻直径不同的齿轮坯时，只需更换上模、下模及模套即可。此外紧固比较牢靠，适合于有顶出装置的模具。模具结构如图 2.7-63b 所示

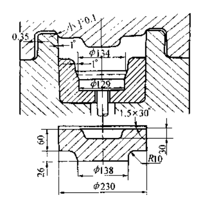
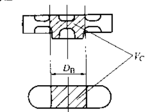
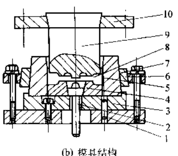


图 2.7-62 摩擦压力机上带有双向导锁的闭式模锻



(a) 齿轮坯



(b) 模具结构

图 2.7-63 齿轮无飞边模锻

1—垫板；2—顶杆；3—下模座；4—下模；5—模套；6—压紧圈；7—压套；8—锻件；9—上模；10—上模压板

4）变形力的计算 计算变形力就是为了确定摩擦压力机的压力，可按下面经验公式计算：

$$P = (17.5 \sim 28)\ KF$$

式中，P 为摩擦压力机的压力，kN；F 为锻件垂直于作用力方向的面积；K 为钢种系数。

对于如图 2.7-64 所示长轴类锻件，在螺旋压力机上常采用整体凹模立式闭式模锻。这类锻件属于直长轴类，但其最大径向尺寸（或边长）与最大高度尺寸之比即 ϕ_{max}/h_{max}、a/h_{max} 或 $b/h_{max} \leqslant 1$，且 ϕ_{max}、a 或 $b > 60$ mm。这类锻件多采



用棒料毛坯经局部镦粗成形，所有模具一般应有顶出机构，适宜于在螺旋压力机、机械压力机、立式液压机上模锻，同时亦可在模锻锤上模锻和在自由锻锤上胎模锻。

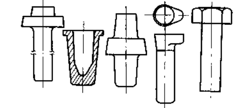


图 2.7-64　立式闭式模锻的长轴件

（4）螺栓类锻件闭式和半闭式镦锻成形

螺栓类锻件多为一次顶镦成形，有时由于锻件头部体积大，需进行一次聚集后再终锻成形。图 2.7-65 为在摩擦压力机上单次顶镦模的结构图。所谓通用螺钉锻模，即按螺钉尺寸不同，更换上模 13、下模 14 和顶芯 15，即可满足不同螺钉的生产要求。若生产批量较大，为增长模具寿命，还可将冷却水通入水管接头 7，对模具进行循环冷却。若锻件杆部过长，可将顶杆头 11 去掉。某厂使用这种结构的顶镦模、镦锻 $\phi12\sim\phi26$ mm、长 29 ~ 190 mm 的几十种螺钉类锻坯，效果良好。

若锻件头部较大，需进行一次聚料和一次终锻工步时，可采用两副模具，两火锻成。为了减少火次，提高生产率，在生产批量较大时，也可采用可滑动的连续顶镦模。该模具的特点是在同一凹模上，用两个可滑动的冲头，在摩擦压力机的两次行程中，完成预镦和终锻成形两个工步。

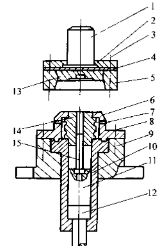


图 2.7-65　通用顶镦锻模结构

1—模柄；2—上模板；3、8—螺栓；4—垫板；5、6—固定板；7—水管接头；9—下模座；10—支承套；11—顶杆头；12—顶杆；13—上模；14—下模；15—顶芯

（5）齿轮轴闭式镦锻工艺

图 2.7-66b 为齿轮轴锻件图，该锻件的闭式模锻工艺过程如下：

1）下料，其尺寸为 $\phi60$ mm × 435 mm。

2）第一步镦粗 $\phi106$ mm 的齿轮部分（图 2.7-66b），该处对应的原毛坯长为 115 mm，长径比为 1.92≤2.0，可直接镦粗成形。所用模具如图 2.7-66a 所示。

3）第二步镦粗 $\phi74$ 的粗大部分，相应的原毛坯长度为 70 mm。所用模具结构如图 2.7-66a。

终锻模（图 2.7-66a）的上下模打靠后，还留有形成横向飞边的余料空间。

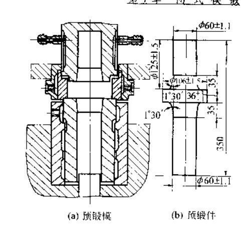


图 2.7-66　齿轮轴预锻模和预锻件

8.3　螺旋压力机上可分凹模模锻

万向节叉（万向节联轴器）（图 2.7-67）及杯杆类零件（图 2.7-68）垂直可分凹模闭式挤压模锻工艺及模具结构如下。

1）万向联轴器叉垂直挤压模锻工艺。图 2.7-67 为吉普车传动轴万向联轴器叉，采用图 2.7-69 所示可分凹模闭式模锻工艺的锻件。原来采用开式模锻生产，坯料加热后，一般经制坯、预锻和终锻成形，然后切除飞边、清理和校正等工序。传动轴万向联轴器叉采用闭式正向分流挤压模锻工艺，可使加热好的坯料一次模锻成形为图示锻件。材料消耗由开式模锻的 1.812 kg 降到 1.30 kg，材料利用率提高了 30%，比在可分凹模中挤压制坯然后精整成形的材料利用率提高 10% ~ 15%，且锻件质量高、尺寸精确。

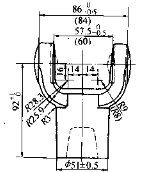


图 2.7-67　传动轴万向联轴器叉锻件图

模锻工艺过程：

① 下料　尺寸规格及精度为 $\phi50$ mm × 80_{-1}^{0} mm。

② 加热　采用感应加热或少无氧化加热，温度范围为 1 200℃ ± 30℃。

③ 模锻　在 10 000 kN 摩擦压力机上采用图 2.7-69 所示可分凹模模具。模锻前模具预热到 200°C 以上，采用水剂石墨作润滑剂。

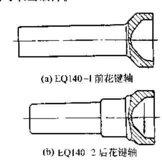
④ 清理飞边　采用小间隙切边模切除沿可分凹模的分模面所形成的小飞边。

利用图 2.7-69 所示垂直可分凹模模具，模锻具有长杆的杯杆类锻件，如 EQ140-1、EQ140-2 花键轴（图 2.7-68a、b），可以克服整体凹模模锻时，摩擦压力机没有大行程顶出器和因接触摩擦阻力过大顶出困难的问题，且模具寿命长，效果极好。

当可分凹模处于图示位置时，两半凹模构成封闭模腔，加热好的棒料毛坯置于模腔中，只需压力机一次行程便可得到预成形件或终锻件。当压力机滑块回程时，顶出器液压缸



柱塞上行，通过铰支顶杆 13 将可分凹模的锥形块向上顶起，在两个锥形块被向上顶起的过程中同时被两个张模器 14 将其拉开，从而可取出锻件。



(a) EQ140-1 前花键轴

(b) EQ140-2 后花键轴

图 2.7-68　带长杆的标杆类锻件

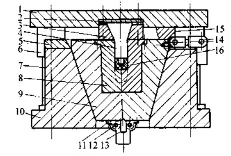


图 2.7-69　圆锥自锁式垂直可分凹模模具

1—上底板；2—垫板；3—压紧圈；4—冲头；5、15—限位块；6—导套；7—导柱；8—凹模镶块；9—锥形块；10—模座；11—铰座；12—销；13—铰支顶杆；14—张开器；16—锻件

这种可分凹模模具结构简单，使用方便可靠。模锻时由于模座的弹性变形，变形金属流入分模面形成一圈很薄的小飞边，但这可采用小间隙切边模切除。

锥形垂直可分凹模在模锻时的受力情况如图 2.7-70 所示。坯料在冲头力 F_0 的作用下产生镦粗反挤和分流劈叉式挤压变形，变形金属力图使两半凹模张开，作用于两半凹模模膛表面上的张模力 F_1 通过锥形块传递到锥形模座上。根据闭式模锻的特点，可假设变形金属作用于凹模模膛表面和冲头端部上的单位压力相等，于是有如下关系：

$$F_1 = F_0 \frac{A_1}{A_0}$$

$$F_2 = F_0 \frac{A_2}{A_0}$$

式中，F_0 为作用于冲头端面上的变形抗力；F_1 为作用于凹模模膛在垂直方向的力，即张模力；F_2 为作用于凹模模膛在水平方向的力；A_0 为冲头横截面积；A_1 为凹模模膛在垂直方向的投影面积；A_2 为凹模模膛在水平方向的投影面积。

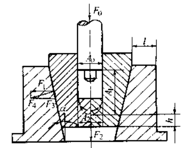


图 2.7-70　模具受力分析

对于给定的锻件，模锻力 F_0 可用工程塑性法或经验公式计算。一般情况下，由于 $A_1 > A_0$；$A_2 \geqslant A_0$，所以有 $F_1 > F_0$；$F_2 \geqslant F_0$。

由此可见，这种模具结构，在闭式模锻时会产生很大的张模力。因此，设计时必须保证锥形模座有足够的强度和刚度，即在保证不破裂的同时，还应使其在模锻时的弹性变形小，以减小或消除飞边的形成。模膛底至镶块底面间也应有足够的厚度。设计时，模座壁厚可按厚壁筒理论计算，同时考虑由于内锥面造成的壁厚不均的影响。

图 2.7-71 为这种可分凹模在模锻时，冲头的作用力 F_0、模座所受水平分力 F_1 及垂直分力 F_3 和锥角 α 间的关系曲线。由曲线的变化可以看出：随着锥角 α 由 15°增大至 25°，当变形力 F_0 增大时，水平分力 F_1 和垂直分力 F_3 也增大；当 α 进一步增大时，三个力都下降；当 $\alpha = 45°$时，三个力大约相等。当 $\alpha = 15°$时，可分凹模沿模座内锥孔自动贴合情况最佳。但若取 $\alpha = 15°$，则两半凹模分模时张开角度小，取出锻件困难，此时只有加大顶出行程，才能增大张开角，但顶出装置的顶出行程往往受到限制，或顶出行程过大影响生产率。因此，设计时，α 可在 15°～30°的范围内选取。

2）模锻钛合金台阶轴的垂直可分凹模模具。图 2.7-72 是在液压机或螺旋压力机上模锻钛合金台阶轴的可分凹模模具。冲头 6 镦锻在凹模中的坯料而成形锻件。两个三棱柱形半凹模 7 和 8 通过销轴 9 与连接推杆 2 铰接，连接推杆 2 固定在压力机的顶出器上。半凹模装在凹模座 1 中，支承表面间的角度为 30°。利用过渡圈 5 把冲头固定在冲头固定器 4 中，利用支承环 3 作凹模顶起时的支承或作为冲头工作行程时的限位。采用这种可分凹模模锻时，由于模具弹性变形，在凹模分模面上会出现厚 0.1～0.25 mm、宽 3～5 mm 的毛刺。

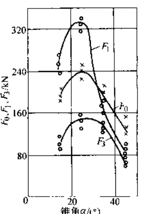


图 2.7-71　模锻力 F_0、水平分力（张模力）F_1 和垂直分力 F_3 同锥角 α 的关系曲线

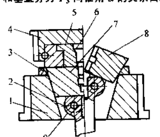


图 2.7-72　模锻钛合金台阶轴的可分凹模模具

图 2.7-73 所示为阀瓣零件图。它是由 3Cr13 马氏体不锈钢材料制成，具有 T 形槽和不对称复杂形状，生产批量大。

此零件原采用车、铣和磨削加工生产，材料消耗大，生产率低。3Cr13 不锈钢有相当高的强度，在 875～900°C 完全



退火后，抗拉强度 $\sigma_b = 550 \sim 600$ MPa，硬度为 170～200HB。从材料性能和零件形状来看，这类异形零件的精锻成形是比较困难的。由于材料强度高，且冷变形时有强烈的硬化倾向。若采用冷锻，很难一次成形，而零件形状又不允许多次挤压。如果采用热锻，材料塑性高，变形抗力较小，成形比较容易，但锻件精度和表面粗糙度较差，且若在高温下加热时间较长则材料有晶粒长大和表面脱碳倾向。采用温锻方法生产，既能良好成形，又能获得较好的精度和表面粗糙度。

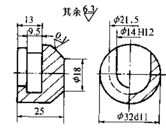


图 2.7-73 阀瓣零件图

锻件图与零件图尺寸相同。仅是在零件的T形槽部分给以7°模锻斜度，转角处以圆角过渡；粗糙度为 $R_a0.1$ μm的锥面处留有磨削加工余量。其余部分的尺寸精度和表面粗糙度与零件图相同。温锻件仅需磨削加工。切削加工生产一个零件消耗的材料可以温锻三个零件，并且提高了生产率，生产成本降低。

温锻生产的工艺过程如下：下料，预镦坯料，在电阻炉内加热毛坯，温锻，去毛刺，热处理，磨削锥面。

① 温锻时金属流动的分析和毛坯形状的确定。毛坯形状和尺寸对锻造时的金属流动和冲头寿命有很大影响，如图2.7-74所示。如果采用单锥面的毛坯Ⅰ，虽然制坯简单，但毛坯Ⅰ中的$Ⅱ_a$部分的金属体积多于锻件对应部分$Ⅰ_a$的体积，锻造时金属流动十分激烈，除了有高度方向的金属流动外，还有横向流动。由于毛坯Ⅰ中$Ⅱ_a$部分金属的横向流动，使冲头 b 处受到很大的横向错移力，引起冲头纵向破裂。如果冲头韧性好，则首先发生张开现象，然后纵向破裂；当冲头硬度高而韧性低时，则不发生张开就破裂。冲头的磨损也很严重。采用毛坯Ⅱ时，毛坯Ⅱ中的$Ⅲ_a$部分的体积约等于锻件对应部分$Ⅰ_a$的体积。锻造时，$Ⅲ_a$部分的金属只有高度方向的流动，没有向$Ⅲ_b$部分的横向流动。所以冲头 b 处没有受到因金属$Ⅲ_a$部分横向流动而产生的错移力。从而避免冲头的纵向破裂，也减少了冲头的磨损。图2.7-75所示为采用毛坯Ⅰ时常发生的冲头破坏形式。图2.7-76所示为毛坯Ⅱ尺寸。

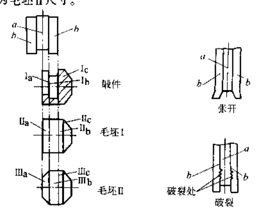


图 2.7-74 毛坯形状对金属流动影响的示意图

图 2.7-75 冲头纵向破裂示意图

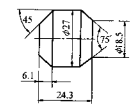


图 2.7-76 毛坯Ⅱ尺寸

② 温锻温度和变形力。温度的选择，要保证零件成形良好，不产生裂纹，有合格的内部组织，达到尺寸和表面粗糙度要求；此外还要有较高的模具寿命。

由圆环镦粗试验获得屈服点 σ_s 与温度 t 的关系曲线（图2.7-77）可知，3Cr13钢的屈服点 σ_s 随温度 t 的升高而降低，温度从600℃提高到800℃时屈服点 σ_s 有较大的降低，温度从800°C提高到900°C时屈服点 σ_s 降低很少。从锻件成形情况来看，随着温度的升高，锻件成形愈好。在温度800℃下温锻时，锻件成形良好，尺寸符合要求。温锻后锻件放在石棉粉中冷却，没有产生裂纹。金相检验表明，温锻件经热处理后的金相组织与切削加工零件的金相组织相同，所以选择800℃左右作为温锻温度。

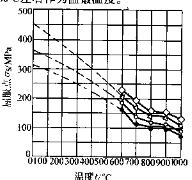


图 2.7-77 3Cr13 钢的 $\sigma - t$ 关系曲线

●—$\varepsilon_h = 20\%$；○—$\varepsilon_h = 30\%$；
△—$\varepsilon_h = 40\%$；□—$\varepsilon_h = 50\%$

按无飞边模锻时变形力的经验公式计算变形力：

$$F = 5\ (1 - 0.001D)\ D^2\sigma_b$$

式中，D 为锻件直径，mm；σ_b 为锻件材料在变形温度下的抗拉强度，MPa。

计算结果得 $F \approx 1\ 200$ kN。

在3 000 kN摩擦压力机上锻造时，锻造温度为800°C，利用图2.7-78所示模具进行双件模锻，用应变仪测量的模锻变形力为960 kN。

③ 模具设计。对于这种不对称的零件，采用一次模锻两件的模锻方法，可大大改善锻模的受力情况。温锻模具结构如图2.7-78所示，可分凹模沿水平分模。上凹模随上模板一起运动，上模板固定在压力机滑块上。滑块下行时，上、下凹模合拢后钩子把上、下凹模关闭。锻造结束后，上模上升的开始阶段，钩子尚未打开，锻件从冲头卸下；面上模继续上行使钩子打开，上凹模和冲头随上模板一起上升至上死点。上、下凹模均固定在预应力圈中。这种水平分模的可分凹模的缺点，是其间隙和钩子的弹性变形而使锻件产生少量横向毛刺，增加了后续工序的困难。拟在今后生产中改进模具结构，使锻件不产生横向毛刺，从而取消去毛刺工序。

图2.7-79所示为冲头工作部分形状。这种形状有利于金属的流动，而转角处以圆角 R 过渡能大大减小应力集中，提高冲头寿命。冲头材料为65Nb钢，热处理硬度为61～63HRC，并经表面软渗氮处理。使用证明，这种模具钢适用



于 3Cr13 不锈钢的温锻。

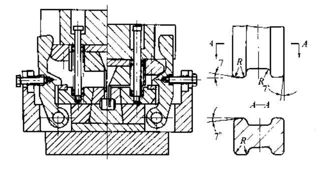


图 2.7-78　阀瓣水平分模温锻模具　　图 2.7-79　阀瓣温锻冲头工作部分形状

温锻时，模具预热到 200～300°C。使用油酸 57% + MoS_2 17% + 石墨 26%润滑剂，润滑效果良好，但有少量润滑剂残存在凹模分模面上，妨碍凹模闭合；此外，这种润滑剂在锻造时放出刺激性气体，是其一大缺点，但提高油酸的纯度可改善这一情况。

8.4　热模锻压力机上闭式模锻

图 2.7-80 所示热模压力机上模锻用典型的闭式锻模结构原理图。其中Ⅰ为整体凹模，Ⅱ为可分凹模。图中①为可动凸模（冲头），②为凹模，③为固定凸模。采用这些模具实现环形件、法兰类锻件、齿轮、轴及传动轴上的滑动叉、万向联轴器叉和十字轴等锻件的闭式模锻。

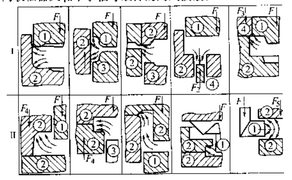


图 2.7-80　热模锻压力机用典型的闭式锻模结构原理图
Ⅰ—整体凹模；Ⅱ—可分凹模

凹模夹（压）紧机构是可分凹模结构设计的关键，下面着重根据凹模压紧机构的不同，来说明几种不同的可分凹模的结构设计、工作原理及所能生产的典型锻件与适用范围。

（1）弹簧压紧式水平可分凹模模锻

图 2.7-81c 所示是弹簧浮动下凹模的可分凹模模具。上半凹模 11 用楔铁 13 固定在上垫板 14 上。模套 6 用楔铁 4 固定在下垫板 2 上。下半凹模 8 和碟形弹簧 7 通过环形圈 10 闭锁在模套 6 的内腔。在挤压模锻过程中由碟形弹簧 7 压紧凹模。位于模套中的冲头 5，其上端进入下半凹模的模孔，而下端进入模套的中心孔。如果锻件卡在下模的模腔内，冲头同时还起顶杆的作用。为了从上模中取出锻件，设置了上顶杆 12。

将加热好的坯料置于下半凹模模腔中，置于冲头的上端上。当曲柄压力机的滑块向下运动时，上半凹模与下半凹模接触并向下移动，压缩碟形弹簧。两半凹模以闭合状态向下移动，并由冲头 5 来挤压坯料。这样，从两半凹模闭合直到挤压模锻终了，凹模的压紧力逐渐上升，至挤压结束时达到最大值，即当两半凹模的张模力达到最大为止。当滑块回程时，顶杆 3 推动冲头 5，后者将锻件顶到下模腔之上，以便从挤锻区中将它取出。然后上顶杆 12、推杆 16 和推杆 3 在弹簧 17 和 19 的作用下返回到原位。垫板 2 和 14 用楔铁 18 和 20 分别固定在下底板 1 和上底板 15 上，两底板用导柱导套导向。

这种模具结构能保证两半凹模自动闭合和脱开，并在坯料的整个变形过程中可靠地压紧两半凹模。为了排出多余金属以及准确充满难以充满的型腔，在凹模中设有锥形余料腔，以保证流入余料腔的变形金属具有较高的阻力。

坯料通过感应加热。采用这种结构的可分凹模模具，在 25 000 kN 热模锻压力机上一步锻成；直径为 238 mm 的一组叠碟形弹簧随着滑块行程的变化而产生对凹模的压紧力为 1 100～1 450 kN。

这种结构比较简单，产生的合模力较大。因碟形弹簧的压缩行程不大，需要多层碟簧才能获得较大的压缩行程，故只适宜于挤压模锻本例所示中间肥大四枝较短小的中小型十字轴（图 2.7-81b）。

（2）带液压压紧装置的水平可分凹模模具

图 2.7-82 为安装在 16 000 kN 热模锻压力机上模锻齿轮的可分凹模模具。如图 2.7-82 所示，工作时由四个液压缸 4 将两半凹模 1 和 2 压紧，然后由凸模 3 施加作用力使毛坯变形。凸模行程 $s = 40$ mm。液压缸压紧凹模与凸模工作行程相配匹，保证给定的工艺特性 $F = f(s)$，在模锻结束阶段，油缸的压紧力达到最大值 1 600 kN。液压缸压紧力与凸模工作行程间的关系曲线如图 2.7-83 所示。

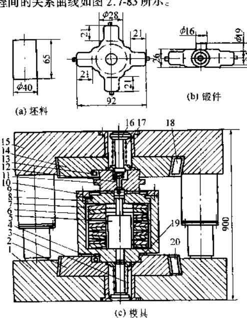


图 2.7-81　十字轴坯料、锻件及模具

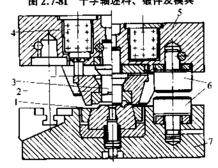


图 2.7-82　带液压压紧装置的可分凹模模具
1—下半凹模；2—上半凹模；3—冲头（凸模）；4—液压缸；5—上模板；6—镦粗台；7—下模板

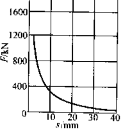


图 2.7-83 压紧力—工作行程曲线

辐板厚度为 7 mm，轮毂高 $H=25$ mm 的导轮的模锻工艺为：毛坯感应加热后在镦粗台上镦粗至其直径比下半凹模直径小 1~3 mm；在有高 2 mm、宽 2.5 mm 的分流腔的终锻模腔中成形；在切边压力机上切去飞边（图 2.7-84）。

原毛坯是用一般精度的轧制棒料在剪床上下料，原毛坯直径 $\phi53^{+0.4}_{-1.0}$mm、重量为 1.18±0.036 kg（开式模锻时毛坯重量 1.35 kg）。下料时，有意使坯料重量比公称重量大 10%，以便彻底研究分流腔容纳更多的多余金属的可能性。

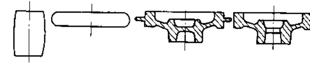


图 2.7-84 齿轮可分凹模闭式模锻工艺过程

当选择分模面在轮缘外径上（$R=57$ mm），且坯料重量比公称重量大 10%时，尽管模膛周围设有缝式分流腔，锻件上仍有高为 0.5~5 mm 的端部飞边，且锻件高度也增加了 1~1.2 mm。当分流腔高度从 2 mm 增加到 2.5 mm 时，可得到更精确的锻件，且没有产生端部飞边。

当分模面从轮缘外径移到内径时（锻件轮缘内半径 $R_1=50$ mm，凸缘高 $H_2=4$ mm），虽然在凸模与上半凹模间存在 0.5~0.6 mm 的径向间隙，但在整个锻件上无端部飞边，甚至当用体积最大的坯料（1.3 kg）、毛坯温度在 800~1 150℃的范围内变化，也没有出现端部飞边。其模锻工艺过程如图 2.7-84 所示。

批量生产的实践表明：对于具有薄而高的轮缘的齿轮锻件，采用可分凹模闭式模锻，将凸模与可分凹模的分模面选择在轮缘的内侧，模锻时，变形金属内所产生的应力—应变状态能促使模膛完全充满，且多余金属流入分流腔而不至流入凸凹模间隙。

(3) 带楔块式压紧装置的水平可分凹模模具

图 2.7-85 所示是 25 000 kN 热模锻压力机上闭式模锻齿轮用的带有楔块式压紧装置的水平分模。

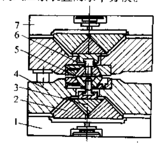


图 2.7-85 带楔块式压紧装置的水平分模
1、7—下、上模座；2—菱形块；3—中心菱形块；
4—可移动板；5—模具镶块；6—凸模

当滑块向下移动时，上、下模具镶块 5 闭合并形成闭式模膛，但装有镶块 5 的可移动板 4 相对于上、下模座 1、7 还继续移动，并压向可移动的菱形块 2，使它们相互靠近。可移动的菱形块 2 沿着可移动板 4 的斜面移动，促使与凸模联结的中心菱形块 3 产生移动，伸入毛坯的凸模 6 将在毛坯上成形冲孔用的连皮，而使挤出的金属充填模具。由模具结构的传力图分析可知，随着模锻力的增加，上下模具镶块的压紧力也随之增大。

(4) 带刚性夹紧装置的水平可分凹模模具

图 2.7-86 所示为模锻 EQ-140 型载重车十字轴的专用模具装置，它被安装在 25 000 kN 热模锻压力机上使用。

上半凹模 7 固定在夹持器 5 内，当上模板与压力机滑块一起处于上限位置时，上夹持器 5 悬挂固定于上模板 1 上的销子 21 上，冲头 8 固定在上模板 1 上，当上半凹模 7 与冲头 8 发生相对运动时，依靠副导柱 6 导向、下半凹模 10 固定在下夹持器 11 中，下夹持器通过弹簧 15 支承在下模板 14 上，冲头 18 固定在下模板 14 上，下半凹模 10 同冲头 18 发生相对运动时，也是依靠副导柱导向，而下半凹模的上限位置由固定于下模板 14 上的限位器决定。括弧楔 9 通过杠杆 4 与连接板 3 相连，调节板 2 通过螺钉固定在上模板上，通过螺栓调节调节板 2 的上下位置，可以调节括弧楔在水平方向上的前后位置。当上模随滑块处于上限位置时，括弧楔的上端支承在上夹持器 5 的法兰边缘上。此时，上、下凹模间有足够大的空间位置。

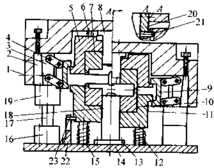


图 2.7-86 带刚性夹紧装置的可分凹模结构
1、14—上、下模板；2—调节板；3—连接板；4—杠杆；
5、11—上、下夹持器；6—副导柱；7、10—上、下半凹模；
8、18—上、下冲头；9—括弧楔；12—弹簧导柱；13—螺钉；
15—弹簧；16—导柱座；17—导柱；19—导套；20—销座；
21—销；22—支座；23—限位销

工作时，将加热好的坯料垂直插入下半凹模的工作筒面落在冲头 18 的顶端上。当压力机滑块向下运动时，上半凹模 7 与下半凹模 10 相碰而暂时停止下移，括弧楔 9 上端挂在上夹持器 5 的法兰边缘上而暂时停止下移。但滑块仍在向下运动，在滑块下移的过程中，括弧楔沿水平方向向前移动而夹紧两半凹模。此后，已闭合的两半凹模与上模板一起下行而压缩弹簧 15，与此同时，上、下冲头镦挤坯料，使坯料金属向四个侧腔流动。由于变形金属产生的张模力而使两半凹模被括弧楔夹持得更紧。当滑块下行到下限位置时，变形金属充满模腔，多余金属从四端余料孔中排出。模锻结束后，滑块回程，在回程过程中，首先两半凹模一起上行，然后，括弧楔与下半凹模脱开，继而上半凹模离开下半凹模并通过销子 21 悬挂在上模板上面一起上升，回到初始位置。

设计要点：这种模具装置结构复杂，设计时必须使夹紧机构的水平运动与上、下凹模的垂直合拢与张开运动协调一致。为此，须作两个方向的运动分析，以求出其相互关系。

夹紧机构同凹模的相互运动关系如图 2.7-87 所示。ax 为水平方向，当括弧楔完全夹紧两半凹模时连杆 Oa 与水平方向即 Ox 的夹角为 α；连杆长度为 L；H 为上半凹模处于初始位置至与下半凹模夹紧时所移动的垂直距离；s 为与 H 对应的水平距离，即从两半凹模开始接触至完全被夹紧时括弧楔在水平方向移动的距离，则两个方向的运动关系为

$$H + h = L\sin\beta = L\sqrt{1-\left(\frac{L-s}{L}\right)^2}$$

经变化后，得

$$H = L\left(\sqrt{1-\left(1-\frac{s}{L}\right)^2} - \tan\alpha\right)$$

图 2.7-87　运动分析示意图

这种可分凹模还可以模锻其他类型的十字轴、十字轴－差速器、齿轮等锻件。

(5) 利用斜而自锁夹紧的垂直可分凹模模具

1) 具有侧面顶出机构的垂直可分凹模

① 模具结构。在 15 000 kN 热模锻压力机上使用带有左、右两个侧而顶出机构的垂直可分凹模模具，其结构如图 2.7-88 所示。冲头 1 用压圈 3 和螺钉 20 固定在模板 2 上。工作镶块 5 和 13 装在由两半凹模 10 和 12 构成的可分凹模上并用螺钉 4 固定。将安装凹模用的斜角为 7°的支柱 8 和 11 安装在模板 9 上并用螺钉 7 固定，然后用螺栓 21 拉紧，并通过间隔衬套 22、螺母 24 的锁紧螺母 25 固紧。两半凹模的升降是通过装在模体内的气动装置来实现的，气动装置由进气管接头 6、带连杆 14 的活塞、直接制于支柱中的动作筒和密封盖 15 组成，用以螺栓固定在两半凹模上的支臂 16 和螺母 18 紧固在活塞连杆上的杆臂 17 把两半凹模与气动装置的活塞连杆连接起来。两半凹模的闭合与张开依靠导向板 23 导向。

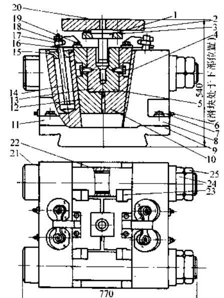


图 2.7-88　带侧面顶出装置的垂直可分凹模

工作前把冲头和凹模加热到 200°C 左右，每一挤锻工序前都要给凹模模腔涂上一层用 70% 润滑油和 30% 石墨制成的润滑剂。所有模具零件除镶块和冲头外都是通用的，即可用来挤压模锻各种尺寸的弯曲锻件。镶块材料使用 3X2B8Ф 和 4X5B2ФC 模具钢，其热处理硬度为 48～52HRC，在挤锻时具有足够高的耐磨性。冲头用 X12Ф 或 X12MФ 钢制造，其热处理硬度为 55～60HRC。冲头和凹模的工作表面加工到粗糙度 $R_a = 1.25 \sim 0.16$ μm。两半凹模的分模面需要磨光。

② 弯曲杆件侧挤模锻工艺。对于图 2.7-89 所示粗头弯轴的杆类锻件，其侧向挤压模锻的实质在于从变形区流出的金属不是流向自由空间，而是流向末端开口的侧向模腔内，侧向模腔与垂直模腔的夹角为 α。α 角根据锻件的形状，可由 0°变到 90°。侧向挤压模锻的特点是从挤料筒内挤出来的金属在整个挤压过程中始终与模腔的表面接触。

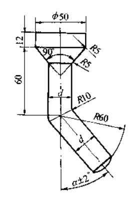


图 2.7-89　弯杆形喷嘴锻件

用 12X18H10T、12X25H16Г7AP 钢和 15X28 热强合金挤压模锻成夹角 $\alpha = 0°$；20°；40°和 60°的弯曲锻件，所用的变形程度 ε 为 59.77% 和 90%，相应的挤压比为 2.44、4.35 和 9.76。在挤压模锻的试验中采用 $\alpha = 0°$（正挤压），是为了找到同样变形条件下的正向挤压模锻和侧向挤压模锻间的差别，并对这两种挤压模锻方法所得的数据进行比较。实验中挤锻了 12 种杆径 $d = 32$、24 和 16 mm 的典型锻件，并对它们进行了研究。

将圆形轧材经车削至直径为 50～55 mm 的原始毛坯。侧挤锻的试验程序如下：将喷砂处理过的并涂有玻璃润滑剂悬浮液的坯料放在硅碳棒加热的箱式炉内加热到以下温度：12X18H10T 和 12X25H16Г7AP 号钢为 1 150 ± 10°C；15X28 合金为 1 120 ± 10°C；12X18H10T 和 12X25H16Г7AP 钢坯料的挤压模锻温度为 1 150～900°C，而 15X28 合金则为 1 120～980°C。

图 2.7-90 所示为变形程度 $\varepsilon = 90\%$，侧挤斜角 $\alpha = 20°$、40°和 60°的锻件。

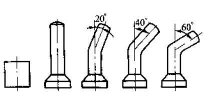


图 2.7-90　可分凹模侧向挤压锻件

③ 与开式模锻工艺对比。采用垂直可分凹模挤锻弯曲锻件，可以减少加热和模锻工步数，并能降低金属的损耗和获得机械性能高的精密锻件。原来采用开式模锻生产弯杆型喷嘴锻件需要 11 道工序，其中包括三道加热工序和 5 道在不同设备上的变形工序（预锻、弯曲、模锻、切边和精整）以及几何尺寸和表面缺陷的检验、表面清理和热处理。为此需要预锻、弯曲、锻造和切边用的四套模具。采用可分凹模模锻后，只需一套模具和一次加热即可完成，提高材料利用率 15%～20%。

2) 具有下顶出机构的垂直可分凹模。在 15 000 kN 热模锻压力机上挤压模锻具有双侧枝耐热钢扩散器锻件及所用的垂直可分凹模模具结构，如图 2.7-91 所示。



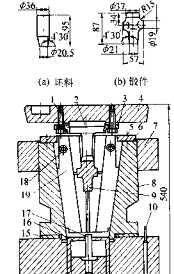


图 2.7-91 坯料、扩散器锻件及挤锻用的模具

冲头 2 用压圈 3 和螺栓 1 固定在上模板 4 上。模套 8 装在下模板 14 上的钢垫 15 上，模套上的卡环 7 用于产生预压压力以增强其刚性。在斜面为 5°的模套内锥面上装有两半凹模 19，其升降靠装在轴承板上通过压缩空气筒 16 来实现。连杆 17 的往复直线运动就保证了两半凹模的上升和下降。上升时两半凹模被螺钉 5 固定在模套上的滑板 6 分开，这些滑板还可限制两半凹模的上升。当两半凹模下降和合拢时，装在一个半凹模上的专用定位销 18 就进人另一个半凹模的定位孔中，以防止两半凹模沿分模面产生错移。压缩空气筒的活塞 11 用螺母 12 固定在连杆上，通过气嘴 10 将 50 N/cm^2 的压缩空气送人带有盖板 13 的筒 16 内使活塞运动。当两半凹模分开时，就可把锻件 9 从模腔内自由取出。

利用这种垂直可分凹模可将图 2.7-91a 所示棒料毛坯，一次挤压模锻成图 2.7-91b 所示的具有双侧枝的接头或阀体锻件。

图 2.7-88 和 2.7-91c 两套可分凹模，对于适合于垂直挤压模锻成形的锻件具有一定的通用性。

3）圆锥自锁式垂直可分凹模

① 模具结构。图 2.7-92c 所示模具由冲头 10 和两半凹模 11 构成，冲头用楔铁 22 固定在冲头座 9 上，两半凹模装在模套 12 内。模套内装有垫板 13 和两个双脚塞（图中未表示出来），垫板中的沟槽供顶起两个半凹模 11 用的顶杆 14 使用。当两个半凹模 11 上升时，依靠双脚塞使它们分开。冲头座 9 和模套 12 用楔铁 7 和 15 及键销分别固定在上模板 2 和下模板 23 上，上模板 2、下模板 23 用楔铁 8 和 19 分别固定在滑块 1 和工作台 16 上。顶杆 4 和处在导筒 3、6 和 17、21 中移动，顶出锻件后在弹簧 5 和 18 的作用下它们又返回到原位。上顶杆零件 4、导筒 3 和 6 以及弹簧 5 在模锻时使用。

② 带双法兰筒形件垂直挤压模锻工艺。图 2.7-92a、b 分别为不锈钢壳体毛坯和锻件。模锻时所使用的设备为 25 000 kN热模锻压力机。将原毛坯置于感应加热炉中加热到 $1\,160^{+10}_{-20}$°C；模锻前将冲头和凹模预热到 100 ~ 200°C；在模锻过程中用由 70% 石墨和 30% 润滑油配制成的润滑剂进行润滑。模锻时只需压力机一次行程便可将原始毛坯挤压成所需锻件，坯料上多余金属由冲头与凹模壁间的间隙（轴向开式分流器）中挤出。

使用新的垂直可分凹模模具可以获得极限偏差为 $^{+0.8}_{-0.3}$ mm、机械加工余量很小的高质量精密模锻件，锻件的宏观组织致密、流线分布与锻件形状一致。模具的修理是沿分模面磨掉一层金属并用铣削或电化学方法修复模腔。凹模经修理后为保持模具的闭合高度，在往压力机上安装凹模时，必须在冲头底下垫上定尺寸的垫片。凹模经过两次修改后所用垫片厚度应不大于 10 mm。

图 2.7-93 所示为具有空腔、凸边、局部加粗和外形凹陷等复杂形状的轴对称锻件。根据其形状特点，采用图 2.7-92 所示垂直可分凹模模锻工艺比较合适。

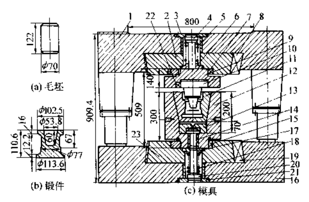


图 2.7-92 圆锥自锁式垂直可分凹模

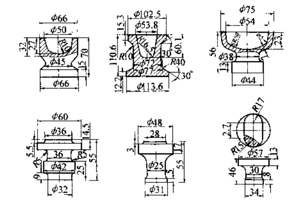


图 2.7-93 形状复杂的轴对称锻件

8.5 曲柄压力机用可分凹模模具设计及实例

重量在 0.5 kg 以下，尤其是在 0.2 ~ 0.4 kg 的三通、四通、十字轴、弯头、粗头弯杆件、阀体和多通接头等枝芽类锻件，如图 2.7-94 所示，比较适合于在中小吨位机械压力机（曲柄压力机）上采用可分凹模模锻生产。

（1）液压浮动式水平可分凹模模具

图 2.7-95b 所示为在曲柄压力机上挤压模锻十字轴的可分凹模模具。上凹模 2 有四个半圆形模膛 3 的侧孔，其直径和长度与热锻件的枝芽直径和长度相同。上凹模 2 固定在上模板 1 上，上模板 1 固定在压力机滑块上。下凹模 4 上具有与上凹模相同的枝芽模膛，但侧孔长度比上凹模的侧孔长 17 mm。下凹模 4 固定在活动模板 5 上，活动模板 5 由压力机的气垫或液压缸支承。冲头 7 固定在下模板 8 上，下模板 8 固定在压力机工作台上。

当压力机滑块处在上死点时，上、下凹模分开，而活动板和下凹模处于上升最高位置。此时，把加热好的坯料直立于下凹模的孔中而支承在固定冲头端面上。当压力机滑块向下运动时，上下凹模闭合形成完整的模膛。随着闭合凹模的

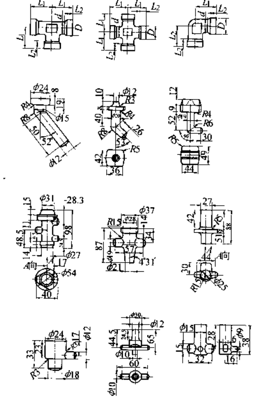
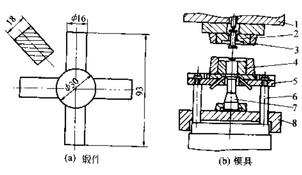


图 2.7-94　一些典型的枝芽类锻件

下行，冲头 7 挤压坯料而获得十字轴锻件。

对于图 2.7-95a 所示十字轴锻件（材料为 20Cr 钢），采用挤压模锻工艺，坯料尺寸为 ϕ28 mm×65 mm，在清理滚筒中清除氧化皮后，经感应加热至始锻温度，然后经压力机一次行程便可得到十字轴锻件。

这种可分凹模模具结构简单，但要求设备上具有气垫或液压缸。但由设备所带的气垫力量小，不能产生较大的合模力。要产生大的合模力，必须附设吨位较大的液压缸。



(a) 锻件　(b) 模具

图 2.7-95　液（气）压浮动式水平可分凹模
1—上模板；2—上凹模；3—半圆形模腔；4—下凹模；5—活动模板；6—托杆；7—冲头；8—下模板

(2) 楔块式水平可分凹模模具

1) 模具的结构及工作原理。图 2.7-96 所示为这种模具结构及工作原理图。下半凹模 15 通过固定垫铁 12 固定在下模板 1 上。冲头 14 通过燕尾槽或 T 形槽固定在侧滑块 13 上，而侧滑块 13 可在下模板的导向槽中作水平滑动。上半凹模 9 通过固定垫板 8 固定在塔形块 7 的底面上。塔形块 7 通过拉杆 5 与上模板 2 相连且能相对于拉杆 5 滑动。楔形块 10 安装在圆筒形动圈 3 上，动圈 3 通过拉杆 6 和小圆柱 4 与上模板 2 相连。动圈 3 与上模板 2 间的相对运动通过套在拉杆 6 上的弹簧的伸缩来实现，且由小圆柱 4 导向。中间楔形块 11 通过燕尾与上模板 2 相连。

模锻时，上模板 2 与压力机滑块一起下行，首先，上半凹模 9 与下半凹模 15 闭合，且与模板 2 推动中间楔形块 11 沿模板 2 的导向槽在向外滑动的同时还与模板 2 一起向下移动、两个中间楔形块 11 推动对应的楔形块 10 与动圈 3 一起下行；随着压力机滑块继续下行，动圈 3 下部的斜面与侧滑块 13 的相应斜面接触，由其水平分力推动侧滑块 13 作向心运动，两个冲头 14 同时挤压坯料，成形锻件。压力机滑块回程时，上模板 2 与中间楔形块 11 同时上升，通过拉杆 5 和 6 使上半凹模 9 和动圈 3 随之上升，冲头随侧滑块 13 复位，顶杆从下半凹模中顶出锻件。

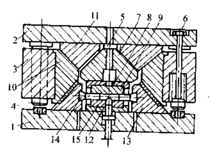


图 2.7-96　楔块式水平可分凹模

这种模具安装在机械压力机上使用，适合于模锻 T 形接头。

2) 楔形块工作机构的运动学分析。图 2.7-97 为工作机构的运动学分析。设压力机滑块下行速度为 v_0，因上模板与滑块固定在一起，故其下行速度也为 v_0。又因楔形块与上模板是用燕尾导轨连接的，故楔形块下行速度为 $v'_1 = v_0$，由图 2.7-97 可得出，楔形块由中心向外移动的速度为 $v'_1 = v'_1/\tan\beta = v_0/\tan\beta$。

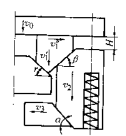


图 2.7-97　工作机构运动学分析

由图 2.7-97 可看出，从上、下两半凹模闭合至模锻结束的过程中，动圈除了与上模板一起下行高度 H 之外，还由楔形块自上模板向下推动了高度为 H 的距离，所以，动圈实际下行了 $2H$ 的距离，则动圈的速度为 $v_2 = v_0 + v'_1 = 2v_0$。

于是，侧滑块和冲头的水平移动速度为

$$v_3 = v_2/\tan\alpha = 2v_0/\tan\alpha$$

若取 $\alpha = 45°$，则 $v_3 = 2v_0$。

由上述分析可知，这种楔形工作机构在转换运动方向的同时还能增速，其增速的大小取决于角度 β 和 α 的大小。对于模锻 T 形接头，其变形是双冲头对向挤压，坯料中部的金属变形速度是冲头移动速度 v_3 的 2 倍，是压力机滑块速度的 4 倍（当 $\alpha = \beta = \gamma = 45°$）。这种增速作用对管接头这类体积小、质量轻的小型锻件的模锻成形是十分有利的。

3) 凹模夹紧力与冲头成形力的关系及各接触面上的压



力计算。可分凹模模锻时，模具的受力分析如图2.7-98所示。设冲头挤压毛坯时，毛坯金属的变形抗力为 F_e，F_e 可由工程塑性法或经验公式计算出来；两半凹模的压紧力为 F_k；下模板 O 同侧滑块Ⅰ、侧滑块Ⅰ同动圈Ⅱ、动圈Ⅱ同中间楔形块Ⅲ、中间楔形块Ⅲ同塔形块Ⅳ和上模板Ⅴ接触面上所对应的摩擦因数分别为 ϕ_{01}、ϕ_{12}、ϕ_{23}、ϕ_{34} 和 ϕ_{35}，由力的平衡条件可导出：

$$F_k = F_e \times \frac{2\cos\phi_{01}\cos(\alpha-\phi_{01}-\phi_{12})\sin(\beta+\phi_{23}+\phi_{35})\cos(\gamma-\phi_{34})}{\sin(\alpha-\phi_{01}-\phi_{12})\cos(\beta+\phi_{23})\sin(\gamma-\phi_{34}-\phi_{35})} \quad (2.7\text{-}48)$$

$$F_{12} = F_e\frac{\cos\phi_{01}}{\sin(\alpha-\phi_{01}-\phi_{12})} \quad (2.7\text{-}49)$$

$$F_{23} = F_e\frac{\cos\phi_{01}\cos(\alpha-\phi_{01}-\phi_{12})}{\cos(\beta+\phi_{23})\sin(\alpha-\phi_{01}-\phi_{12})} \quad (2.7\text{-}50)$$

$$F_{34} = F_e\frac{\cos\phi_{01}\cos(\alpha-\phi_{01}-\phi_{12})\sin(\beta+\phi_{23}+\phi_{35})}{\sin(\gamma-\phi_{34}-\phi_{35})\cos(\beta+\phi_{23})\sin(\alpha-\phi_{01}-\phi_{12})} \quad (2.7\text{-}51)$$

$$F_{35} = F_k/2 \quad (2.7\text{-}52)$$

式（2.7-48）～（2.7-52）为各相应接触面上所承受的压力，根据此压力及相应零件材料的许用应力可计算各接触面积的大小，以此作为设计依据。

设式（2.7-48）右边分式 $= m$，则式（2.7-48）变为

$$F_k = mF_e \quad (2.7\text{-}53)$$

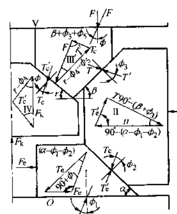


图2.7-98 模具受力分析

式（2.7-55）即为凹模夹紧力同冲头挤压成形力间的关系式。当取 $\alpha=\beta=\gamma=45°$ 时，若 $\phi_{01}=\phi_{12}=\phi_{23}=\phi_{34}=\phi_{35}=0$，即假设所有接触面上的摩擦因数为零，可得 $m=2$，$F_k=2F_e$；若接触面上的摩擦因数均取0.05，则可得 $m=2.7$，$F_k=2.7F_e$。考虑到摩擦因数的影响，当改变 α、β、γ 时，可使 m 值在0.9～5.7间变化。

所推导的关系式表明，模块式工作机构可以使坯料金属的变形抗力自动反馈到上半凹模上，使上半凹模对下半凹模的闭合力即两半凹模对坯料金属的夹紧力扩大 m 倍，也就是说，在整个模锻过程中，凹模夹紧力一直比冲头挤压力大 m 倍而随之变化。

如何确定最佳比值 m，实际上是如何选择斜角 α、β 和 γ。多向模锻的一个显著特点就是不让坯料金属流入分模面形成飞边，这只要保证凹模夹紧力大于或等于由于侧向挤压造成的张模力即可实现。

对于闭式模锻，可假设坯料金属对上、下凹模模膛和冲头头部的单位作用力相等，故凹模夹紧力与张模力间的关系可以转化为锻件分模面的水平投影面积 A_L 同各端部垂直侧面与冲头接触面积 A_H 的比例关系，即

$$m \geq A_L/A_H \quad (2.7\text{-}54)$$

对于任何一种管接头锻件，其水平投影面积同各端垂直侧面面积之和的比值总是可以确定的，即 m 值可以求出。

忽略各相对滑动面上的摩擦影响，取 $\beta=45°$，得

$$m = 2\cot\alpha\cot\gamma$$

该式与式（2.7-54）联立，解得

$$\cot\alpha\cot\gamma = A_L/A_H \quad (2.7\text{-}55)$$

由式（2.7-55），并考虑冲头工作行程的大小，可选择出合理的 α、γ 角。

（3）多用途楔块式水平可分凹模模具

1）结构与性能特点。图2.7-99所示多用途楔块式水平可分凹模模具，与图2.7-96楔块式水平可分凹模模具的结构与工作原理基本相同，但与其相比，具有如下特点：

① 具有四组楔块式工作机构，当对称的两组工作时可以模锻变径二通，当任意三组工作时（图2.7-100）可以模锻三通，当四组全工作时可以模锻四通或小型十字轴锻件。工艺用途比较多。而图2.7-96模具仅有对称的两组楔块式工作机构，只能模锻变径二通和等径T形接头。

② 对于四个水平侧滑块10，设置有四对刚性退出机构17，当水平侧滑块与冲头挤压模锻完成后，刚性退出机构17随上底板1回程时，利用下部斜面（虚线）的水平分力将侧滑块反向推移，带动冲头11从锻件的孔中退出。由此说明，该模具可以模锻带有较深不通孔的管接头锻件，而图2.7-96模具不能挤孔。

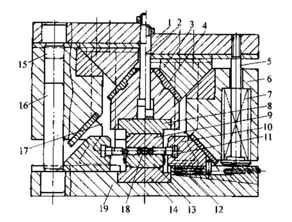


图2.7-99 多用途楔块式水平可分凹模模具装置

1—上底板；2—螺杆；3—楔块；4—塔形块；5—螺栓；6—动圈；7—弹簧；8—上凹模座；9—上半凹模；10—侧滑块；11—冲头；12—弹簧；13—下半凹模；14—下凹模座；15—导柱；16—导柱；17—刚性退出器；18—工件；19—下底板

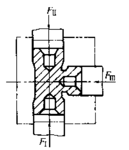


图2.7-100 三通管接头多向挤压模锻示意图

③ 该模具具有四组导柱导套，每根导柱分为上段15和下段16，两段同时对动圈6上的导套孔导向，因此，该模具

上、中、下三部分的导向准确，可分凹模的合模精度高。而图 2.7-96 模具，仅上底板上的导柱对动圈导向，因此，可分凹模的合模精度完全靠人工调整，且受设备导向精度的影响。

④ 该模具装置的四组楔块工作机构在多向挤压模锻时，由厚壁圆筒形动圈 6 构成一封闭的受力系统（图 2.7-98），加上四组导向机构，因此，在水平方向可承受非对称平衡力，因而，就可以在水平分模状态下实现三通管接头的多向挤压模锻。图 2.7-100 模具装置就不可能。

2）三通管接头多向挤压模锻工艺。对于三通管接头锻件，当采用开式模锻时，需要多道制坯工序，迫使坯料金属流向枝通。当采用多向挤压模锻时（图 2.7-100），棒料毛坯首先在冲头Ⅰ、Ⅱ作用下产生径向挤压，然后在冲头Ⅲ的作用下实现镦粗和冲孔。三通管接头属于典型的枝芽类锻件，无论以哪种变形方式来模锻，其工艺难度都大，因此，选择其作为代表，进一步介绍相应的工艺和模具设计的细节。

① 多向挤压模锻时成形力与合模力的实验数据。将图 2.7-99 可分凹模模具装置安装4 000 kN闭式单点压力机上使用，在试验与生产 Z14 型三通管接头（图 2.7-101）时，采用电测法对成形力和合模力进行了测试，所记录的力—行程曲线如图 2.7-102 所示。记录的部分数据列于表 2.7-12。

更可靠的是经实际生产考核，锻件无飞边，工艺稳定，说明装置设计合理，工作可靠。

② 冲头形状和尺寸对金属流动性能的影响。通过试验发现，在三通管接头多向挤压模锻中，冲头工作部分的形状及尺寸对金属流动性能即锻件充满程度有很大影响。如图 2.7-103 所示，当冲头头部作成锥形且尺寸较大时（图 2.7-103a），四方凸台（管钳夹紧面）容易充满，即使毛坯体积不足，也只是旁通长度不够，而锻件轮廓清晰，主通端部不易产生轴向飞边。当冲头头部作成直径较小的圆柱时，只有旁通端部同主通端部镦挤成同样平整时，四方凸台才能充满，这种情况下导至挤压力及凹模夹紧力急剧增加；对于体积为负偏差的毛坯，常常出现方形凸台轮廓不清晰或旁通的内孔、外圆呈椭圆形（图 2.7-103c），甚至孔的内壁产生拉缩现象。当在小圆柱根部同大圆柱之间加上过渡圆锥时（图 2.7-103b），其工艺稳定性又能恢复到第一种情况。很明显，这是因为管端壁部逐渐变薄，模锻时冷却快，阻力大，有利于中间部分的金属向旁通型腔中流动和充满四方凸台型腔。

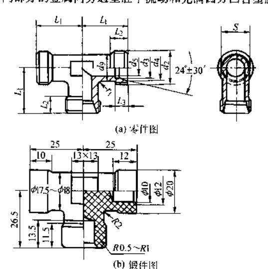


图 2.7-101　三通管接头

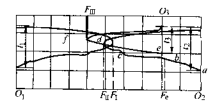


图 2.7-102　Z14 型三通管接头多向挤压模锻力—行程曲线

试样：材料 35#，尺寸 ϕ17.6 mm × 65 mm，

加热温度：1 120°C

表 2.7-12　模锻 Z14 型三通管接头的实验数据

序号	$F_{Ⅲ}$/kN	$F_{Ⅱ}$/kN	$F_{Ⅰ}$/kN	F_k/kN	$F_k/(F_{Ⅰ}+F_{Ⅱ}+F_{Ⅲ})$
1	280.3	490	540	2 420	1.84
2	261.3	465.8	486.9	2 220	1.83
3	242.3	390	408.1	2 000	1.92
4	204.3	380	408	1 960	1.98
5	199.5	379.5	379.5	1 840	1.92
6	225	372.6	372.6	1 840	1.90
7	210	326.3	362.3	934.6	2.01
8	210	356	365	930	2.02

注：试验时坯料尺寸为 ϕ17.6 mm × 65 mm；模锻温度（表中自上至下）在 850～1 150℃。

③ 三通管接头多向挤压模锻技术经效益比较。图 2.7-101 所示三通管接头采用多向闭式模锻与采用普通开式模锻相比的情况。该锻件的开式模锻工艺流程为：坯料加热→立式镦头→切边→清理→加热→终锻成形→切边。其多向挤压模锻工艺流程为：坯料加热→终锻成形。采用多向模锻工艺后：节省材料 30%以上；减少热加工工序 4～5 道、冷加工工序 1～2 道，相应节省设备 6～7 台（次）、减少操作工 7～8人（班）；尺寸精度由 10～9 级提高到7～8级，表面粗糙度由自由表面降低到 R_a25～12.5 μm；降低产品成本 30%以上；此外，还改善了生产条件，降低了劳动强度。

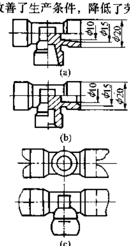


图 2.7-103　冲头形状和尺寸对金属流动的影响

（4）杠杆式垂直可分凹模模具

1）模具结构和工作原理。如图 2.7-104 所示，冲头 8 固定在上模板 2 上，上模板 2 面定在压力机滑块上。模座 3 为一矩形框并固定在下模板 1 上构成下模座，杠杆 4 同分别固定于下模座和凹模衬垫 10 上的铰座 5 和 9 铰接。凹模镶块 7 固定在衬垫 10 中，可分凹模的组合结构（两半）支承在托板 6 上，托板 6 通过顶杆 13 与气垫或液压缸活塞相连。



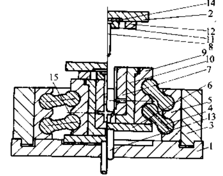


图 2.7-104 杠杆式垂直可分凹模模具

1、2—下、上模板；3—模座；4—杠杆；5、9—铰座；
6、14—托板、垫板；7—凹模；8—冲头；10—衬垫；
11—冲头固定器；12—限位块；13—顶杆；15—侧向顶杆

当托板与顶杆处于下限位置时，两半凹模合拢形成整体凹模模腔。模锻时，将加热好的棒料毛坯直立插入凹模模腔中，压力机滑块下行，冲头挤压毛坯，变形金属充满模腔，模锻结束后，冲头随压力机滑块上升，通过气垫或液压缸活塞使顶杆上升，两半凹模张开，侧向顶杆顶出锻件，此时便可取出锻件。

这种模具适宜于安装在热模锻压力机或液压机上使用，可以用于闭式模锻小型十字轴等锻件。其优点是能保证锻件具有稳定的尺寸，因在模锻过程两半凹模随模锻力的增大而贴合得更紧，故不会在分模面上形成飞边。

这种垂直可分凹模模具专门用于生产异形三道及弯头管接头精密锻件，如图 2.7-105 所示。

2）模具受力及变形分析。图 2.7-106 为杠杆式垂直可分凹模模锻时的受力情况。由图示关系可得出张模力为

$$F_1 = F_0 A_1 / A_0$$

式中，F_1 为作用于凹模模膛表面的张模力；F_0 为作用在冲头端面上的变形抗力，可通过工程塑性法或经验公式计算；A_0 为冲头端面面积；A_1 为凹模模膛在垂直方向的投影面积。

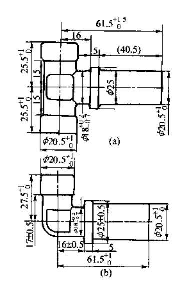


图 2.7-105 异形三通及弯头

张模力 F_1 通过杠杆传递到模座上，杠杆所受的压缩力 F_2 为

$$F_2 = \frac{F_1}{2\cos\alpha} = \frac{F_0 A_1}{2A_0\cos\alpha}$$

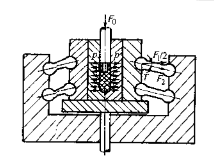


图 2.7-106 杠杆式可分凹模受力分析

式中，α 为杠杆相对于水平线的倾斜角。

根据虎克定律，杠杆在压力 F_2 的作用产生的压缩变形为

$$\Delta l = \frac{F_2 L}{EA}$$

式中，Δl 为杠杆的压缩变形量，mm；L 为杠杆未受力时的长度，mm；A 为杠杆横截面面积，mm^2；E 为杠杆材料的弹性模量，MPa。

由图 2.7-107 可得出，杠杆受压缩后其长度缩短了 Δl 后，已闭合的凹模由开始合模时的位置 B 下移至 B'，其下移距离 Δh 可由图示几何关系得出：

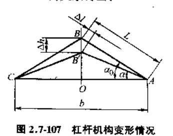


图 2.7-107 杠杆机构变形情况

$$\Delta h = L\sin\alpha_0 - (L - \Delta l)\sqrt{1 - \frac{b^2}{4(L - \Delta l)^2}}$$

虽然由于杠杆的弹性压缩而使凹模的水平位置发生变化，但两半凹模始终被紧密地贴合在一起，变形金属不可能被挤入分模面。

8.6 双动压力机可分凹模模锻

双动曲柄压力机用可分凹模的工作原理及典型结构如图 2.7-108 所示。图 2.7-108a、b 为水平可分凹模结构，模锻时，将已加热好的坯料置于下模，随着压力机滑块下行，首先外滑块使上半凹模与下半凹模闭合形成封闭模腔，接着内滑块带着冲头下行挤压工件，模锻结束后，压力机回程，内滑块首先上升带动冲头从锻件中退出，然后外滑块带动上半凹模离开下半凹模，即可取出锻件。图 2.7-108c 为垂直可分凹模结构，模锻时，随着压力机滑块下行，首先由外滑块带动模套走完工作行程，模套的内锥面将两半凹模模芯夹紧而形成封闭模腔，然后内滑块通过冲头使坯料变形而得到锻件。

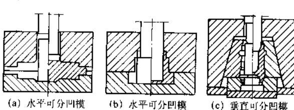


图 2.7-108 双动压力机用可分凹模的典型结构

图 2.7-108a 所示结构适合于模锻带枝芽类的实心锻件，如十字轴、三星轴等。图 2.7-108b 所示结构适合于模锻带法

兰的杯形和端盖类锻件。图 2.7-108c 所示结构适合于模锻带双法兰的筒类锻件。

（1）垂直可分凹模模锻

1）可分凹模结构及工作原理。图 2.7-109 所示为在内、外滑块作用力均为 5 MN 的双动压力机上使用的垂直可分凹模模具。由图可见，凹模分为下凹模和上凹模，下凹模由凹模圈 4 和冲头 3 构成，凹模圈 4 通过连接杆 2 支承在顶出杆 1 的法兰上，冲头 3 固定在工作台上。上凹模由镶块模芯 5（两半）、上模圈 6、底板 7 和挡圈 10 组成。镶块模芯 5 可沿上模圈 6 内滑动，当压力机滑块处于上限位置时，两半模芯 5 落在挡圈 10 上，处于最大张开状态。凹模圈 4 也处于上限位置，此时，它的中心孔与冲头 3 的端面形成放置毛坯的工作筒。

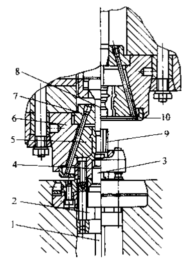


图 2.7-109 垂直可分凹模模具

模锻时，首先将加热好的棒料毛坯 9 直立于下凹模内，压力机外滑块首先下行，当镶块模芯与凹模圈相碰就停止运动，而上模圈 6 随外滑块继续下行至其圆锥面将两半模芯彼此压紧并同时使两半模芯与凹模圈紧密贴合在一起，构成封闭的模腔；与此同时，内滑块向下移动，冲头 8 对封闭在模腔中的坯料施加作用力而使其变形。在冲头 8 作用于坯料的过程中，外滑块迫使支承在顶出杆 1 上的整个凹模向下移动，则冲头 3 相对于凹模向上移动，使坯料的下端也产生变形。双冲头对向镦挤，坯料变形均匀，易于得到具有双法兰的筒形锻件。

上、下冲头工作端分别与上、下凹模圈模壁间的径向间隙成为坯料变形时的轴向分流腔。

2）在双动压力机上利用可分凹模生产筒类锻件。图 2.7-110 各中心线右边所示均为在双动压力机上利用图 2.7-109 所示可分凹模一次模锻成形的筒类成带孔锻件。其中第

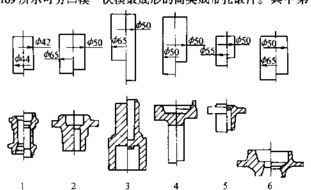


图 2.7-110 筒类锻件

2 个零件需两工步完成，第一工步预锻实心法兰，第二工步对向反挤成形；第 3 个零件也需两个工步，第一工步反挤成形带一短实心杆的杯筒形，第二工步反挤成空心杆部。图中左半边所示是在 10 MN 机械压力机上通过专用装置模锻相同锻件所需坯料及所得到的锻件形状。对于这六个锻件，采用新老两种工艺的对比情况见表 2.7-13。

表 2.7-13 对比情况表

锻件名称及编号	1）套筒	2）法兰叉	3）旋转支耳	4）法兰轴	5）法兰筒	6）法兰阶台
节省材料/%	11.6	46.4	44.3	11.8	33.3	30.6

（2）水平可分凹模模锻

在双动压力机上利用如图 2.7-112 所示水平可分凹模实现图 2.7-111 所示带法兰零件的无飞边模锻，同普通模锻工艺相比节省材料达 30%，提高生产率 1.5～2 倍。

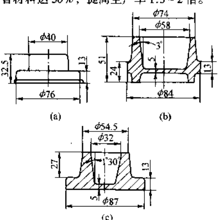


图 2.7-111 法兰类锻件

1）工艺分析。对于带法兰的实心件（图 2.7-111a），在闭式模锻中主要是以径向挤压的方式使变形金属充填法兰型腔；对于带法兰空心件（图 2.7-111b、c），在闭式模锻中主要是径向挤压和反挤两种方式使变形金属充填法兰和筒部型腔。根据分流腔必须设在模腔中最后充满的位置的原则，对于前者，分流腔只有设在法兰端部的周围，如图 2.7-112b 所示。对于后者，可在两个位置：一个位置与实心法兰件的位置相同，设在法兰模腔的周围；另一个位置设在筒部的顶端，如图 2.7-112a。若也在法兰端部周围设置分流腔，必然导致模腔内压力的显著增大，同时增加切除飞边的附加工

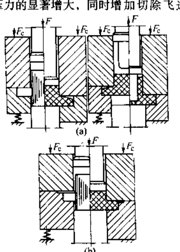


图 2.7-112 水平可分凹模工作原理

序。所以，将分流腔设在筒的顶端更合理。由此，可以确定，对于实心且带法兰零件的闭式模锻，仅需一个工步成形；对于空心带法兰零件分两个工步成形：第一个工步初步成形法兰，第二工步反挤成形。

2）模具结构。如图 2.7-113 所示，可更换的工作部分由上半凹模 3、下半凹模 5、冲头 11 和顶出器 6 组成。冲头 11 通过冲头垫及夹持器 1 固定在内滑块 14 上。上半凹模 3 通过夹持器 2 固定在外滑块 13 上。下半凹模 5 通过固定圈 10 固定在压力机的工作台 8 上。在固定圈 10 上装有四根导柱，实现同支承垫板 9 的导向，后面两根导柱 4 实现上、下凹模的导向。在冲头夹持器 1 上用四根导柱 12 同上半凹模夹持器 2 导向。下半凹模固定圈 10 支承在四个压缩气缸 7 的活塞杆上。模锻前，下半凹模被压缩气缸活塞杆抬起在初始位置，形成工作筒以安放坯料。

工作过程：加热好的坯料垂直放入工作筒，压力机滑块下行，首先两半凹模闭合，形成闭式模膛，然后两半凹模一起下行到接触支承板 9 而被压紧。此时，内滑块下行，冲头 11 对坯料施加作用力使变形金属径向流动形成法兰（得到带法兰的实心件或作为带法兰空心件的第一工步），或对带法兰的实心预成形件进行反挤成形（作为带法兰空心件的第二工步）。变形金属充满模腔后，多余金属流入分流腔。模锻结束后，滑块回程，冲头回到原始位置，顶出器由凹模中顶出锻件。

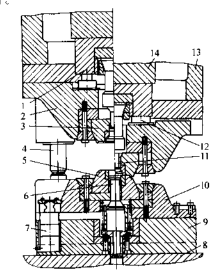


图 2.7-113 水平可分凹模模具结构

在双动压力机上采用闭式模锻工艺生产带法兰锻件，单工步的生产率为 8～9 件/min；双工步的生产率为 4～5 件/min。模具寿命 6～9 千件，平均每件节省金属材料 0.265 kg，由此工艺组成的生产线每年节省钢材 257 t。

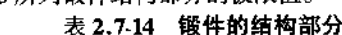
8.7 高速锤闭式模锻

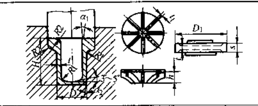
与其他模锻设备上的闭式模锻比较，高速锤闭式模锻的优点是能模锻出薄肋、薄壁、薄腹板、小圆角半径和小模锻斜度的锻件，并且由于提高了金属材料利用率降低了劳动量，可取得良好的技术经济效果。由于国内有关资料不完善，故主要借助相关文献来论述。

（1）高速模锻工艺的制定

制定高速模锻工艺方案和制定其他变形工艺方案一样，包括以下主要内容：绘制锻件图和选择变形方式（开式模锻或是闭式模锻）；计算模锻时的动力参数和选择适当功率的锻锤；计算单工步的原始毛坯尺寸和多工步模锻时每一工步的异形坯料尺寸；根据材料牌号、原始毛坯尺寸和锻件的生产批量选定加热规范和加热设备；选择润滑剂和从锻件上清除氧化皮、油垢及其他污物的方法。

1）制定锻件图。根据高速锤模锻的特点和可能性制定的锻件图，可确定不需进行机械加工的表面，对其余表面则要规定机械加工余量。切削加工余量及锻后加工表面和不加工表面的公差均按表面粗糙度 $R_a = 20 \sim 10$ μm 进行规定。制定钢、钛、热强合金和铝合金锻件图时，必须遵守表 2.7-14 和表 2.7-15 所列锻件结构部分的极限值。


表 2.7-14 锻件的结构部分 mm



结构部分名称	结构部分的极限值（≥）	结构部分名称	结构部分的极限值（≥）
$h/t_1 \leq 40$ 时的肋厚度 t_1	1.2～2	外圆 R_2	2
$H/D \leq 2$ 时的壁厚度 t	2	模锻斜度：	
$D_1/t_1 > 30$ 时的腹板厚度 s	3	内 α_1	0.5～1
圆角半径：		外 α_2	0～0.5
内圆 R_1	3		

表 2.7-15 M7352Б 型高速锤所制锻件各部分的极限值

mm

锻件部分	有色金属	不锈钢	锻件部分	有色金属	不锈钢
最大直径	300	250	最小圆角半径		
最大高度	260	200	外圆	0.5	1.0
肋的最小厚度 t	1.2	1.5	内圆	2	3
肋的最大高度	45t	20t	机械加工余量	1.5～2.0	1.5～2.0
腹板的最小厚度	2	4			

高速变形可保证所得热强钢和不锈钢及钛合金锻件表面粗糙度 $R_a = 2.5 \sim 1.25$ μm 和 $R_z = 20 \sim 10$ μm，而铝合金的 $R_a = 1.25 \sim 0.32$ μm。冲孔前对孔和连皮要做标记，标记的方法和普通锻造一样。有时模具上没有脱模器，就把锻件上端的标痕深度减小，否则锻件会卡在冲头上。

2）确定变形方案及工艺参数。根据锻件的类型、填充模腔时金属的流动方向、流线分布的要求、锻件重量和金属材料利用率来选定变形方案。用高速模锻方法模锻难变形材料时，模锻前的坯料准备要比普通模锻的仔细一些。高速锤模锻必须严格遵守模锻温度范围。选择温度的主要依据是零件的晶粒度和机械性能（强度、塑性和冲击韧度）。模锻铝合金时，为了避免高速模锻时的过热，模锻温度要比在普通模锻锤和压力机上模锻时的温度（460°C）低 100～130°C。

高速锤锻件具有等轴细晶粒致密组织，与普通模锻锤锻件相比，其机械性能要高 10%～15%。高速锤模锻的一次打击可以使金属得到很高的变形程度（超过 30%），获得细晶粒组织，但因变形时间极短（约 0.005 s）以及锻件的薄截面在模具中迅速变冷，使再结晶过程来不及进行，因而保留了变形组织。

3）变形能量计算。高速锻锤是根据放置模具的模锻空间和模锻锻件所需的能量选定的所需的打击能量 E 可按下式计算：

$$E = KeV$$

式中，e 为单位变形能量（可由与每种牌号材料的变形程度有关的曲线图中找到），J/cm³；V 为坯料体积，cm³；K 为

锻锤打击有效系数决定的系数（$K=1.2\sim1.4$）。

如果模锻形状复杂的锻件所需要的能量超过计算值，则计算打击能量时必须考虑锻件复杂系数 K_1（等于 1.5～2.5），即

$$E=K_1KeV$$

按上述公式确定形状复杂锻件的打击能量时，应将锻件的镦粗和挤压部分分开计算，然后再相加。由于作用时间短，真实的模锻力很难测定。但已知变形锻件所需的能量和上模的工作行程，则平均模锻力 F 为

$$F=E/L$$

式中，L 为上模的工作行程。

根据平均模锻力就可确定冲头端部或镶块的单位平均模锻力。模壁上的单位模锻力与冲头上的单位模锻力大致相等，模套的尺寸由模具的计算强度来确定。

4）高速锤模锻的典型锻件及其基本工艺参数。高速锤上模锻的一些典型难变形材料锻件如图 2.7-114 所示。所需的基本工艺参数列入表 2.7-16 中。从该表中所列工艺参数可以看出，高速锤模锻所需要的气体压力和打击能量是不同的并取决于下面的诸因素：坯料尺寸、材料性质、锻件形状和尺寸、模锻温度。

为了使高速锤安全工作，变形时的打击能量 E 应按模具的工作行程 L 来选定（图 2.7-115）。高速锤模锻的原始坯料尺寸应按填充模腔的方法来选定，如果用镦粗方式填充模腔则取原始坯料的高径比 $H/D=0.8\sim2.0$；如果用挤压模锻的方式填充模腔，则取 $H/D=0.2\sim1.0$。为预防形成折叠和穿流，镦粗时坯料的横截面尺寸覆盖住凹模和冲头端部轮廓。

难变形材料，特别是热强合金的钛合金坯料，模锻前应将模具预热到 200～300℃。

制定工艺过程时应注意按表 2.7-17 选定容许和临界的变形程度和极限流动速度。

（2）模具设计和制造特点

根据模锻件的形状和规定的变形方式来确定模具的结构型式。因高速锤模锻时模具在瞬间内要承受很大的载荷，所以模具应为刚性结构，零件数量尽量减少并且没有应力集中。

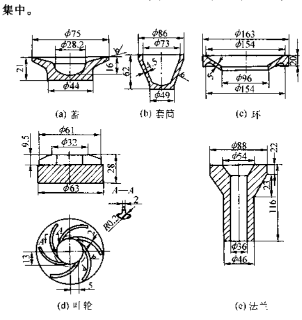


图 2.7-114　M7352Б 型高速锤所制的典型锻件

表 2.7-16　模锻典型锻件所需的基本工艺数据

锻件名称	材料牌号	坯料尺寸 d/mm × l/mm	锻件的最大外轮廓尺寸 d/mm × h/mm	模锻温度 /℃	气体（氮气）压力/kPa	打击能量 /J	对击速度 /m·s⁻¹
盖	AB	40 × 42	75 × 21	300	70	1 200	5.0
套筒	12X18H9T	48 × 44	86 × 62	1 150	470	8 500	14.0
环	12X17Г9AH4	160 × 120① × 20	163 × 27	1 160	500	8 800	14.5
浆叶式叶轮	AB	174 × 43	175 × 74	400	800	15 000	17.5
法兰	12X21H5T	87 × 40① × 58	88 × 116	1 160	470	8 500	14.0

① 坯料内径

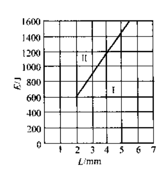


图 2.7-115　M7352Б 型高速锤模锻时打击能量 E 的变化与变形工作行程 L 的关系

Ⅰ—工作区；Ⅱ—非工作区

高精度锻件最好采用预应力结构闭式模具制造。在 M7352Б 型高速锤上模锻各种类型锻件用的闭式锻模结构，如图 2.7-115～图 2.7-120 所示。对模具装置提出的要求是：结构简单，安装和调整方便，固定可靠有足够的强度。在模锻形状复杂的锻件时，即需要小的打击能量，或者反之在很短的变形行程内释放出很大的能量时，模具和锻锤的零件中将产生相当大的内应力，使锤头可能发生跳动，锤头的跳动和锤的连击可能造成模锻件的报废。因此锻件的肋应在下半凹模内成形。

必须考虑到，用 70% 以上的变形程度在闭式模具中模锻形状复杂的锻件时，冲头和凹模之间所形成的飞边可能会焊死在冲头上，这会导致模具迅速磨损和每次打击后需要进行清理，如果锻件非加工表面的部分或机加工余量最小的表

表 2.7-17 高速模锻难变形材料的变形程度和极限流动速度

材料	临界变形范围/%	推荐的变形程度范围/%	极限流动速度/m·s⁻¹
12XH3A、30XГCA、40XH2MA、10X13、30X13、12X18H9T、12X17Г9AH4 等合金不锈钢	5~20	20~95	350~400
37X12H8Г8MФБ、15X18H12C4TЮ 等耐热钢	1~12	15~90	300~350
XH70BMTЮ、XH78T、XH77TЮP、XH75BMЮ、XH62MBKЮ 镍基高温合金	1~12	20~40	80~120
AB、AK6、AK8、B75、B76 等铝合金	5~10	25~90	300~350
AMГ6、AMГ7 铝合金	5~10	25~40	100~150
BT3-1、BT5、BT5-1、BT6、BT8、BT9、BT15、OT4、BT22 钛合金	1~15	20~95	300~350

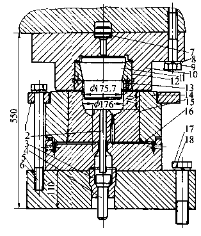


图 2.7-116 闭式模锻带肋锻件用的模具
1—紧固圈；2—顶杆；3—导筒；4—推杆；5—底板；
6、9、17—紧固螺栓；7—定位器；8、18—垫圈；10—冲头模座；
11—冲头；12—锥形圈；13—螺纹紧固圈；
14—凹模模套；15—凹模；16—垫板

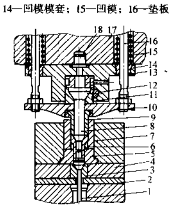


图 2.7-117 闭式模锻空心法兰盘锻件用的模具
1—顶杆；2—过渡垫板；3、5、13—导筒；4—垫板；6—凹模；
7—挤料筒；8—冲孔针；9—冲头；10—横梁；11—压圈；12—楔铁；
14—壳体；15—弹簧；16—螺栓；17—锻杆；18—定位器

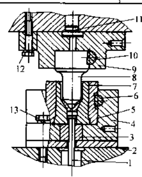


图 2.7-118 闭式模锻盘、圆盘和粗头的杆型锻件用的模具
1—顶杆；2—过渡板；3—导筒；4、9—下模壳体、上模壳体；
5—凹模模套；6、10—楔铁；7—凹模；8—冲头；
11—夹头；12、13—紧固螺栓

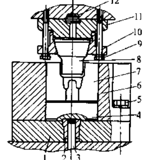


图 2.7-119 可分凹模闭式模锻管接头叶片、扩散器、转接头锻件用的模具
1、11—过渡垫板；2—导筒；3—顶杆；4—垫块；
5、9—紧固螺栓；6—凹模模套；7—可分凹模的镶块；
8—冲头；10—压紧圈；12—夹头

面需要用冲头成形的话，将模锻的温度降低，并将冲头和凹模之间的单边间隙由 0.1~0.2 mm 加大到 0.4~0.5 mm，就可消除焊合现象。增大间隙会使端部飞边加厚，易于脱离冲头而留在锻件上。加厚的端部飞边可用砂轮打磨或用切削加工方法切除。把冲头头部倒成 C2 的倒角也能消除焊合现象。填充冲头倒角区的金属温度低于基体金属，这样就减少了流入冲头与凹模之间所形成的间隙中的飞边。变形时在该处作用力施加方式也会对减少飞边的流出有影响。

用高速锤模锻时，最好把凹模和冲头做成整体，因为在模锻过程中金属的塑性很高，遇到任何小孔间隙和分模面都会流入，这对锻件的脱模不利，并使模具迅速磨损。在模锻叶浆式叶轮、风扇和叶片类复杂的带肋锻件时，应在金属难于充满的最深模腔（肋、叶片及锻件其他较薄的部分）处钻直径为 1~2 mm 的几个小孔，以便将润滑剂燃烧所生成的气体和空气排出。

空气和气体也可以通过顶杆的间隙排出。在凹模（镶块）内表面的上部应做成入模带，如同普通模锻设备上闭式模锻或挤压模锻时用的一样，当冲头进入凹模带可以起到导向的作用。冲头的台阶上不允许陡然过渡。冲头的支承面应做得尽量大一些，转接半径不得小于 5 mm。如果半径较小，建议采用带镶块的组合冲头。变形开始前，冲头进入凹模挤压筒内的深度应为 5~7 mm。圆柱形冲头按其高径比 $H/D \leq 3\sim4$ 的比值来确定。凹模镶块是以 0.25（直径为 60~80 mm 时）到 0.4~0.45 mm（直径为 100~120 mm）时的过盈热配合压入模套中。如果单位变形力较大时（大于 1 200 N/mm²），过盈量还需加大 25%~30%。模具工作表面的粗糙度应为 $R_a = 0.32\sim0.080$ μm。



取高冲击韧度和热稳定性的高强度钢作为模具材料，希望这些材料具有高的疲劳极限、抗磨性和低的线膨胀系数。高速模锻模具零件所常用的前苏联和其他国家的材料见表2.7-18。

表 2.7-18 制造模具零件用的材料

零件名称	俄罗斯材料		其他国家材料	
	材料牌号	硬度 HRC	材料牌号	硬度 HRC
冲头	5XHB	46~48	$6F_2$	37~40
	4X4BMΦC 4X5B2ΦC	48~52	H13+1.5Ni S1	56
凹模	4X4BMΦC 5X3B3MΦC	48~52	H13 H13+1.5Ni	56
	4X5B2ΦC	46~50	H11	48
冲头镶块	4X4BMΦC 4X5B2ΦC	46~52	H13、S1、S5	46~48
冲头模座	40X、5XHM	42~46	$6F_2$、4340	37~40
垫板	5XHM、40X	40~46	$6F_2$、H11	37~40
主冲头	4X3BMΦ	46~50	H11、H13	48~52
凹模模座	5XHB、5XHM	42~48	4340、H11	48~52
顶杆	X12Φ1、P18、3X2B8Φ 4X5B2ΦC	52~55	—	—
模套	30XГCA、40X	38~42	—	—

(3) 一些典型锻件的高速闭式模锻

1) 桨叶式叶轮（图2.7-114d，表2.7-16。它是带肋锻件的代表之一，其工艺过程如下：

① 下料，材料为AB材料，坯料尺寸为 ϕ62 mm×30 mm，质量为0.25 kg。

② 加热，坯料在电炉中加热到300℃，在此温度下保温30~40 min，加热前先在炉底上面垫一块12X18H9T不锈钢板，以免在加热过程中镁石耐火砖的碎屑粘在坯料上，模锻时被压入锻件内。装炉前坯料都要酸洗，去掉表面上的油脂或其他脏物。

③ 模锻，采用图2.7-118所示模具在M7326Ъ型高速锤上闭式模锻，加热好的原始毛坯置于凹模中，一次打击成形。所需氮气压力为150 N/cm²，相当于打击能量28 000 N·m，模具对击速度为7.5 m/s。锻件的基本工艺参数列入表2.7-16中。

④ 锻后热处理，锻件经模锻后需要进行酸洗，除去小的飞边和其他缺陷，最后进行100%的检验。

下面以盖、套筒和法兰（图2.7-114a、b、c）锻件为例，研究模锻盲孔或通腔锻件的典型工艺。

盖（AB材料）、套筒（12X18H9T材料）和法兰（12X21H5T材料）锻件，在M7352Б型高通锤上分别用图2.7-118的闭式锻模（模锻盖和套筒）和图2.7-117的闭式锻模（模锻法兰）一个工步锻成。盖和套筒锻件分别用 ϕ40 mm×42 mm及 ϕ48 mm×44 mm的坯料制造，面法兰用外径87 mm、内径44 mm、高58 mm的空心坯料制造。盖的坯料在电炉中加热到300℃，套筒和法兰的坯料在高温炉内加热到1 160℃。盖锻件是用打击能量为12 000 N·m，氮气压力为70 N/cm² 和对击速度为5 m/s锻成的；套筒锻件是用打击能量为88 000 N·m，氮气压力为500 N/cm² 和对击速度为14.5 m/s锻成的；法兰是用打击能量为85 000 N·m，氮气压力为470 N/cm² 和对击速度为14 m/s锻成的。盖、套筒和法兰的模锻工艺参数见表2.7-16。

2) 环形锻件（图2.7-114c）其工艺过程为：

① 下料，材料为12X17Г9AH4，外径×内径×高为160 mm×120 mm×20 mm的空心坯料。

② 加热，坯料加热温度为1 160℃。

③ 成形过程，第一步在锤头重量为1 000 kg的锻锤上通过胎模镦粗和冲孔；第二步在MP1半自动扩孔机上进行扩孔；第三步，在M7326Б型高速锤上采用图2.7-117所示的模具中闭式模锻成形。所用打击能量为88 000 N·m，氮气压力为500 N/cm² 和对击速度为14.5 m/s。锻后通过顶杆将锻件从凹模中顶出。所模锻的锻件无模锻斜度并有相当薄的腹板和法兰盘（5 mm）。

3) 管接头、转接头和扩散器类锻件（图2.7-120）。以BT8钛合金叶片为例说明其工艺过程：

① 下料，用车削 ϕ46 mm的坯料或 ϕ50 mm的轧材先锻后铣成矩形截面的原始毛坯，其尺寸为46 mm×22 mm×35 mm，重量为0.27 kg，侧面四条棱边倒角C1和一端倒角C4。

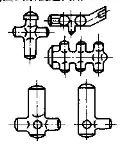


图 2.7-120 三通接头、扩散器和转接头

② 加热，加热前将坯料涂上ЭBT-24玻璃珐琅，然后在电炉中用40 min加热到950℃。

③ 挤压模锻，在M7326Ъ型高速锤上采用图2.7-119所示可分凹模内挤锻成预成形锻件。挤锻时的打击能量为6 500 N·m，氮气压力360 N/cm² 和打击速度为12.8 m/s。

④ 终锻，在16 000 kN水压机上采用开式模锻终锻成形。

4) 齿轮高速锤锻模（图2.7-121）

5) 叶片及翼型件的锻造。高速锻造技术允许在比较小的模具面积上施加大的能量和力。因此，这种工艺广泛地应用于翼型件的锻造，这是一种薄壁结构，要求很高的锻造载荷。

帕金松（Parkinson）和蒙那享（Monahan）报道了在迪那



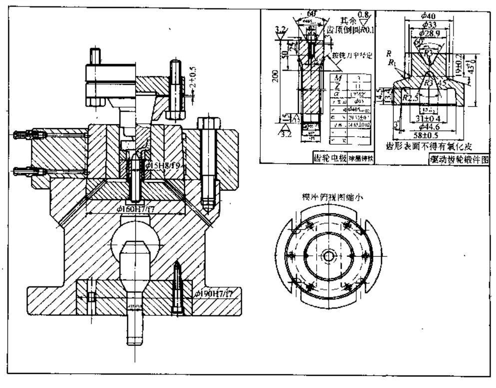


图 2.7-121 齿轮高速锤闭式锻模

派克型高速锤上精锻铝青铜和 410 不锈钢发动机叶片的例子，摩莱克（Murek）和克劳斯（Knauss）报道了在可控能量流动成型高速锤上成功地精锻了 7005 铝合金叶片，保证了成品公差，并获得了一套锻造15 000个零件的模具寿命。在这种设备上同样还精锻了钛合金和不锈钢叶片，锻件获得成品公差或接近成品公差。在精锻了 300 片 403 不锈钢汽轮机叶片后，模具未见明显磨损，锻造叶片的尺寸仍在规定公差范围之内。

格兰维尔-约翰斯讨论了钛合金叶片的锻造，并且称在一次打击成型的锻件上遇到表面缺陷和剪切缺陷。对于 Ti-6 Al-4V 合金来说，在 β 相变温度以上进行锻造是有很大的优越性，但是，β 锻造叶片的疲劳强度是否能满足要求还不十分清楚。克劳莱（Crawley）和维尔斯（Wills）报道了一项成功的涡轮叶片研制项目，它是在美国工业公司的高速锤上锻造的，整个外围留有 1.3 mm 的机械加工余量，但未注明叶片的材料。圆棒坯采用电阻加热，然后在普通锻造设备上预锻两端，这样的预锻件在高速锤上终锻成叶片。

文献中的有关情报以及西德万加登公司的可控能量流动或型高速锤的制造厂最近所做的实验研究结果都表明，高速锤肯定适用于经过挑选的翼型和叶片之类的锻件。目前，至少有两家公司在生产上采用可控能量流动或型高速锤来精锻铝合金、不锈钢和钛合金涡轮及压力机叶片。加利福尼亚州精密金属产品公司锻造了几种叶片类的锻件，材料有 7075 铝合金、403 不锈钢和钛合金，根据具体零件和订货情况生产的数量从 200 件至 100 000 余件不等。尤脱加分公司（Utica Division）为了进行叶片生产，在 1971 年安装了一台55 t·m 的可控能量流动成形高速锤，目前这家公司是以高速锻作为生产工艺来制造不锈钢和钛合金叶片。通常在可控能量流动成型高速锤上锻造叶片不是一锤锻成的，根据不同的材料和形状的复杂程度，预锻件的外形在终锻之前要进行几次加热和几次锤击，就像普通锤锻工艺一样。

6）其他零件的锻造。过去十年来，对各种材料零件的高速锻造进行了许多研究工作。研究结果表明，除叶片以外，最成功地应用高速锻造的是圆形或接近于圆形的锻件，这是由于高速锻造特殊的模具设计要求所决定的，这个问题稍后将进行讨论。在可控能量流动成型高速锤上所锻造的典型零件包括一次或几次反挤压的各种外形的杯形零件，材料有含 18% Ni 的 250 马氏体时效钢、AISI 1117 和 Ti-6 Al-6 V-2Sn。

斯根（Skeen）指出：高速锻造比普通锻造具有的主要优点是它能生产出公差更小、外形更复杂、截面较薄和表面较光滑的零件。图 2.7-122 所示为在 1 176°C 一次打击成形的 AISI4140 钢的涡轮盘，金属在很高的速度下流向模具的外壁来充填轮缘部位。图 2.7-123 所示是一个外装马达的飞轮轮

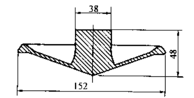


图 2.7-122 热锻涡轮盘的横截面，显示高速高能锻造薄壁的能力[3]

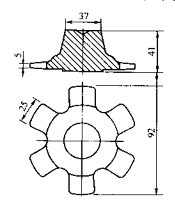


图 2.7-123 在 1 176℃一次打击成形的 AISI8640 钢飞轮轮毂

毂，它是用直径 32 mm、长为 108 mm 的 AISI8640 钢在 1 176°C一次打击成形的。在普通锻造压力机上需要四次打击才能成型这个零件。图 2.7-124 所示为一锥形岩石钻头，它是应用高速锻造的另一个例子，是用 5.6 kg 的 AISI4815 坯料一次打击成形的。

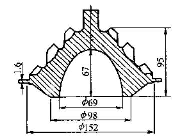


图 2.7-124 用 5.6 kg 坯料一次打击成形的锥形岩石钻头

彼得尔朋（Peterbon）和比夫尔（Pipher）在迪那派克高速锤上锻了两个纯钼的锻件，并断定：（a）钼可在低至 593℃锻造而不出现内部和外部缺陷；（b）在高速锤上，普通锻锤上和水压机上锻造纯钼的冶金结构和硬度是类似的。

李渥棠（Riordan）和高基恩（Goudreau）描述了本狄克斯-尤梯卡（Bendix-Utica）公司使用迪那派克高速锤生产锻件的情况。最高生产率达每小时 50 件，除一种例外，生产批量都在 25 件至几百件的范围内，锻件材料包括 H-11 工具钢、HastelloyC 钛合金和各种合金钢，锻件的外形大多数是圆的或接近圆的，所有锻件都需机械加工到一般的精度要求。

拉克（Lake）和莫拉兹（Moracz）在锤上、液压机上、机械压力机上和可控能量流动成型高速锤上进行结构件的锻造，目的是要对这四种锻造设备的性能进行对比。他们得出结论认为高速锤在锻造某些结构件，仅限于一定范围，对 α-β 钛合金和镍基合金来说，因为它的闭合速度太快，难以形成高质量的轮缘和腹板结构，使之达到设备能量所允许锻得的那样薄和精细的程度。

如前所述，在高速锤上可以成功地锻造的零件，大多数是圆截面的。而关于金属流动、预成形情况、表面质量和精度等问题则和普通锻造时所遇见的问题相似。在某些情况下，高速锤易于成型复杂的外形和很薄的腹板。但是，在这种情况下，模具的磨损和破坏是很严重的。所以，应用高速锤来生产普通锻件，实质上是一个经济问题，主要是模具寿命问题和生产率问题。

编写：夏巨谌（华中科技大学）

第8章 多向模锻

1 多向模锻的特点及应用范围

1.1 多向模锻的特点

多向模锻综合了模锻和挤压的优点，突破了模锻锤、水压机和曲柄压力机的局限性；改变了一般锻件敷料大、余量和公差大、肥头大耳的落后状况；更重要的是，可锻出其他各类锻压方式无法或较难生产的形状复杂的锻件。多向模锻为实现毛坯精化、少或无切屑加工，以及优质、高产、多品种、低消耗开辟了一条新途径。

多向模锻工艺的主要优点如下。

1）与普通模锻相比，多向模锻可以锻出形状更为复杂，尺寸更加精确的无毛边、无模锻斜度的中空锻件，使锻件最大限度地接近成品零件形状尺寸。从而显著提高材料的利用率，减少机械加工工时，降低成本。

2）多向模锻只需毛坯一次加热和压机一次行程便可使锻件成形，因而可以减少模锻工序，提高生产效率，并能节省加热设备和能源，减少贵重金属的烧损、锻件表面的脱碳及合金元素的贫化。一次加热和一次成形，还意味着金属在一火之内得到大变形量的变形，也为获得晶粒细小均匀和组织致密的锻件创造了有利条件，这对于无相变的高温合金具有重要意义。

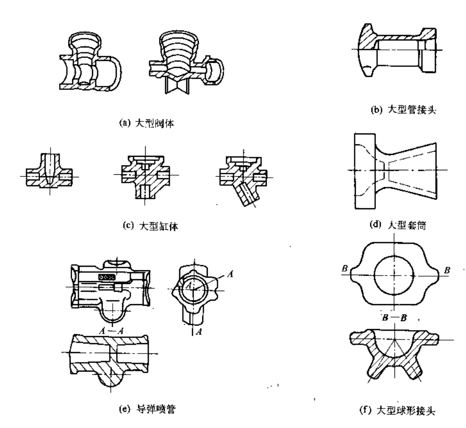
3）由于多向模锻不产生飞边，从而可避免锻件流线末端外露，提高锻件的力学性能，尤其是抗应力腐蚀性能。

4）多向模锻时，毛坯是处于强烈的压应力状态下变形的，因此，可使金属塑性大为提高，这一点对于锻造温度范围窄的难变形合金来说尤为重要。

1.2 多向模锻工艺的适用范围

多向模锻可锻出其他各类锻压方式无法或较难生产的形状复杂的锻件，如中空架体、大型阀体、管接头、套筒体、飞机起落架、导弹喷管、发动机机匣、燃油泵壳体、盘轴组合件、高压阀体、高压容器、球形接头等。因此，在航空、石油、化工、汽车、火箭及核动力等工业部门中得到广泛的应用。一些典型大型锻件如图 2.8-1 所示，中小型复杂锻件如图 2.8-2 所示。

若干多向模锻件与普通模锻件的经济性对比列于表 2.8-1。



(a) 大型阀体　(b) 大型管接头　(c) 大型缸体　(d) 大型套筒　(e) 导弹喷管　(f) 大型球形接头

图 2.8-1 典型大型的多向模锻件

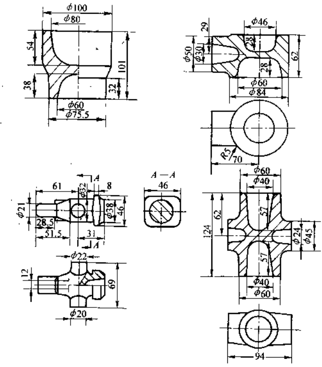


图 2.8-2　中小型复杂多向模锻件

表 2.8-1　多向模锻件与普通模锻件的经济对比

锻件名称	项　　目	完成锻件工序（道）	零件质量 /kg	锻件质量 /kg	毛坯质量 /kg	材料利用率 /%	机械加工工时 /h
下套筒	普通模锻	19	0.76	8.80	10.0	7.60	3.08′
	多向模锻	8	0.76	5.05	5.12	14.9	2.38′
喷管	普通模锻	13	2.0	6.10	8.89	22.5	3.52′
	多向模锻	7	2.0	4.22	4.32	46.3	3.12′
大外筒	普通模锻		1.75	10.30	10.80	16.3	34
	多向模锻		1.75	5.02	5.20	33.7	32.30′
小外筒	普通模锻		0.83	5.10	5.35	15.5	34
	多向模锻		0.83	3.13	3.20	25.9	32.30′
球形接头	普通模锻	22	0.97	3.47	5.13	18.9	45
	多向模锻	9	0.97	2.0	2.05	47.3	19
缸体	普通模锻		4.5	13.7	15.2	29.6	
	多向模锻			8.1	8.7	51.7	

2　多向模锻工艺及金属流动分析

2.1　多向模锻工艺

(1) 多向模锻工艺原理

多向模锻是在多向模锻水压机或机械压力机上，利用可分模具，毛坯经一次加热和压机一次行程作用，获得无飞边、无模锻斜度（或小斜度）、多分支或有内腔、形状复杂的锻件的一种新工艺。

多向模锻零件成形是在具有多个分模面的封闭腔内进行的，因此，也可以称之为可分凹模模锻。可分凹模与冲头作水平或垂直方向的运动而形成多向模锻工艺过程。若按分模面的特征可分为水平分模、垂直分模和混合式分模三种基本形式。当凹模闭合后，单个冲头或多个冲头自不同方向同时或先后对毛坯进行挤压，如图 2.8-3 所示。

第一种情况（图 2.8-3a）是把两半凹模固定在水压机的水平柱塞上，将主变形冲头固定在垂直的主柱塞上，以水平柱塞压紧两半凹模，把坯料装入模腔中，用主冲头对其进行变形，然后再用辅助冲头完成锻件的最后成形。打开两半凹模，用水平柱塞从模腔中顶出锻件。

第二种情况（图 2.8-3b）是把两半凹模分别固定在水压机工作台和垂直的主柱塞上，主变形冲头则固定在水平柱塞上，接着把坯料装入下半凹模，使上、下两半凹模合拢并压紧，主冲头对坯料进行变形，然后再用辅助冲头完成锻件的最后成形。打开两半凹模，用垂直冲头从模腔内顶出锻件。

第三种情况（图 2.8-3c）是把坯料放在下模上，使两半凹模合拢、压紧并用上冲头进行变形，然后再把两个水平冲头挤入坯料中，从垂直方向对锻件进行冲孔。此后，打开锻模，将锻件从模腔中取出。

多向模锻水压机挤压模锻的锻件尺寸精度可达 4 级，表

面粗糙度 Ra 为 40 ~ 10 μm。锻件组织致密，流线分布与锻件形状一致，机械性能符合技术要求。

(2) 毛坯的形状和尺寸

毛坯的形状和尺寸对锻件成形有着重要的影响。如对水平分模的导弹喷管进行了5种不同形状和尺寸的毛坯试验，如图2.8-4所示。其中，图2.8-4a和b是预制坯，这两种毛坯两端的体积与锻件两端的体积相等。变形时，由于小端变形阻力大，而且定位不牢，因而有一部分金属流向大端。由于这两种毛坯的变形过程为纯挤压变形（见图2.8-5a），结果大端料多而压不靠，小端料少而充不满。图2.8-4c也是预制坯，在成形方面比a、b好，但因制坯时卡腰的尺寸不准确，而且在型腔中放置的位置不易调整，因此，影响毛坯体积分配和锻件成形。图2.8-4d、e所示两种毛坯均采用 $\phi70$ 的圆棒料，由于图2.8-4d种毛坯是沿整个长度方向压扁，结果在锻件的大端产生壁厚不均匀的现象。图2.8-4e所示毛坯在相应锻件大端留30 mm的长度不压扁，结果锻件成形良好。其原因是毛坯的形状细长，变形方式为镦挤综合变形（图2.8-5b）。此外，图2.8-4e所示毛坯在型腔中放置的位置可以调整，使毛坯体积得到合理分配。由此可见，正确选择毛坯形状和尺寸及其体积分配，对锻件成形有直接影响。要求毛坯尺寸精确，下料时应按严格的公差，且采用锯切下料为好。

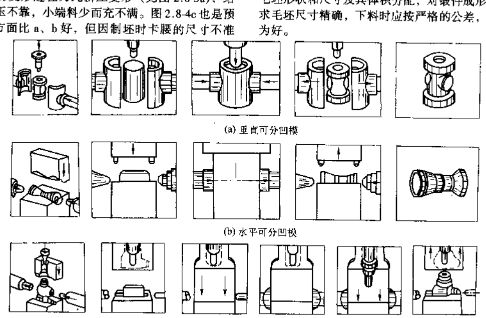


图2.8-3 多向模锻水压机上多向模锻的基本型式

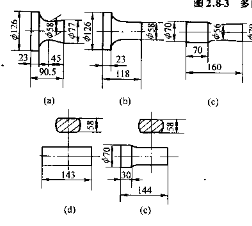


图2.8-4 喷管毛坯的形状和尺寸

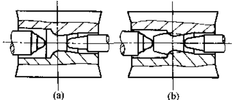


图2.8-5 双向挤向成形

(3) 多向模锻预锻件的设计及预锻工序的选用

对于多向模锻，当金属变形量超过塑性变形规则、毛坯金属中有明显的温度不均匀现象以及锻件过于复杂等情况下，必须设计预锻工序。前一种情况下应设计预锻工序的原因已作了分析说明。对于第二种情况即当毛坯金属中有明显的温度不均匀现象时，将导至低温部分难于变形，变形抗力急剧增高；高温部分在冲头退出时，特别是当冲头冲完深孔后脱模时，如果脱模力超过该部分的热极限强度时，可能会在高温部分将锻件拉断而报废。另外，温度不均匀现象与锻件图的设计也有一定的关系。锻件过于复杂时也往往会导至多冲头冲孔时的不同步和温度变化严重不均匀，从而导致不能一次模锻成形。

现以图2.8-6a所示套筒锻件为例，讨论预锻工序的设计问题。该锻件在成形过程中出现中部温度高，两端温度低的现象，故需设计预锻工序。其预锻件如图2.8-6b所示。由图可见，预锻工序使套筒锻件外形和两端的孔成形。第二道工序即终锻时工件毛坯纯属反挤压成形，如图2.8-6所示。终锻时两端的凸圆台及凸耳只是在水平方向与挤压冲头运动相反的方向平移，不再参加变形，中间部分的两个凸耳也不参加变形。

预锻件的长度尺寸 L 根据毛坯变形前后体积相等的原则计算，面确定尺寸 a 和 b 时应保证毛坯金属在反挤压时不产生横向变形。

图2.8-7所示为轴耳的预锻和终锻工序。轴耳因形状结构的复杂性难于一次成形，该锻件是在20 000 kN多向模锻液压机上进行锻造的。在预锻工序（上图）中冲头冲出头部的两个不通孔，同时依靠冲孔时的挤压作用使头部的凸耳预成形。终锻（下图）时的主要变形是对预锻件的实心杆部进行反挤而形成空心杆部。此外，锻件头部左右两孔被做成平底，与此同时，借助三个冲头的挤压作用使凸耳达到所要求的形状和尺寸。

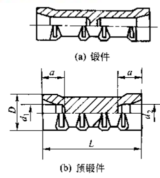


图 2.8-6　套筒锻件预锻工序的毛坯

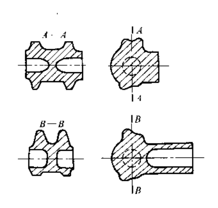


图 2.8-7　轴耳的预锻和终锻

表 2.8-2　典型多向模锻件的工艺参数表

锻件名称	分模方式	材料牌号及规格	加热温度/℃、时间/min 和设备	模具预热温度/℃	使用设备压力/kN	模锻次数	模锻温度范围/℃	润滑及脱模	锻件冷却方式
下套筒	水平分模	30CrMnSiA ϕ80 mm × 125 ± 1 mm	1 200 ± 10 20 ~ 30 油炉	150 ~ 200	压模 9 600 变形 4 600	1	1 200 ~ 850	石墨 + 机油	堆冷
助力器小外筒	垂直分模	30CrMnSiA ϕ68 mm × 110_{-1}^{0} mm	1 200 ± 10 20 油炉	150 ~ 200	压模 4 600 变形 3 200	1	1 200 ~ 850	石墨 + 机油 毛坯端面放脱模剂	堆冷
球形接头	联合分模	GCr9 ϕ70 mm × 68_{0}^{+1} mm	1 200 ± 10 15 ~ 20 油炉	150 ~ 200	压模 4 600 加套圈 变形 6 400	1	1 150 ~ 800	石墨 + 机油	堆冷
缸体	水平分模	20Cr ϕ100 mm × 141 mm	油炉	—	压模 9 600 变形 3 210	1	1 200 ~ 880	石墨乳剂	堆冷

(4) 典型多向模锻件的工艺参数

我国近年来生产的典型多向模锻件的工艺参数列于表 2.8-2。

2.2　多向模锻中的金属流动分析

多向模锻过程中的金属流动与锻件的形状、毛坯形状和尺寸、变形方式、变形温度和润滑等因素有关。而金属流动情况，对锻件成形质量、模具寿命、力能消耗等均有较大影响。图 2.8-8 所示为缸体（图 2.8-1c）锻件在多向模锻成形过程中的金属流动情况。缸体多向模锻采用水平分模，两个冲头对向进行挤压成形。由于锻件形状在连皮两侧不对称，两端的变形程度、变形阻力等也就不同。因此，两端的变形过程与金属流动也有差别。第一阶段的变形如图 2.8-8a 所示，当两个冲头接触毛坯端而开始加压时，由于毛坯与凹模之间存在空隙，金属沿径向流动，此时以镦粗为主，同时也有少量的挤压变形。当毛坯与模壁间空隙充满后，冲头继续对向运动，如图 2.8-8b 所示，一旦小孔端充满后，冲头继续压入，主要是闭式冲孔变形，而在大孔端，金属沿冲头运动反向流动，主要为反挤压变形。由于侧向阻力很小，金属容易流向平台和凸耳，这就产生侧向挤压，如图 2.8-8c 所示。在冲头行程的最后阶段，金属主要向凸耳深处流动，而在小孔端还向冲头运动方向流动，可以认为是侧正挤压变形，在大孔端的金属除了流向凸耳深处外，也向大孔端流动，可认为是侧反挤压变形。

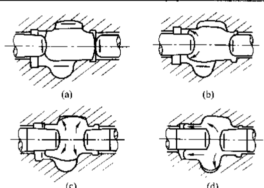


图 2.8-8　缸体多向模锻金属流动示意图

3　多向模锻力的计算

多向模锻件成形要克服金属自身的变形抗力、金属流动时与型腔间的摩擦力、锻件成形金属充填型腔的抗力及多模块的张模力。变形力与合模力须进行计算。

(1) 变形力的计算

影响变形力的因素很多，如锻件形状和材质、变形温度、变形程度、变形速度、变形方式（镦粗或挤压成形）和金属流动时与型腔的摩擦力等，故要计算准确是很困难的。尤其是闭式模锻时，坯料的体积对变形力影响很大。因此，目前在生产中常采用以下经验公式计算：



$$F = KA\sigma_b$$

式中，F 为变形力；K 为锻件形状系数，取 6～8。形状简单取小值，形状复杂取大值；A 为锻件在变形方向的投影面积；σ_b 为锻造温度下的金属抗拉强度。

(2) 合模力的计算

多向模锻的凹模是采用可分的组合模，毛坯在封闭型腔中变形时，对模壁产生一种使可分凹模分开的张模力。因此，必须在可分凹模上施加一个能克服张模力的合模力，才能避免产生开模现象。当合模力不足时，张模力可使凹模张开，导致锻件形成飞刺，影响锻件质量，并能加速模具的磨损。因此，正确计算合模力，对选择设备吨位和保证锻件质量是极为重要的。

为了确定合理的合模力，应先求张模力 F_{zh}，可按下式确定：

$$F_{zh} = p_{ce}A_{he}$$

式中，p_{ce}为变形金属作用于凹模壁上的侧向平均单位压力；A_{he}为锻件在合模方向上的投影面积。

实践表明，在终锻时，无论是实心圆柱体还是空心筒形件，侧向平均单位压力均小于变形的平均单位压力。因为变形金属并非流体，而是具有一定塑性的固体，加之变形金属与模具上下端面间的摩擦作用，均会阻碍金属侧向流动，从而造成侧向单位压力的减少。因此，在终锻时侧向平均单位压力可写成：

$$p_{ce} = (0.8\sim1)\ p$$

式中，p 为锻件变形的平均单位压力。

合模力与分模方式有关。垂直分模多向模锻过程如图 2.8-9 所示，图中 F_{he}为液压机侧向柱塞 4 和 7 通过推杆 3 和 6 给予凹模的合模力；F_{zh}为变形终了时，锻件对可分凹模 2 和 5 所产生的张模力；F 为变形终了时的变形力。

图中 2.8-9a 为原始位置，两半凹模合在一起，但尚未施加合模力；图 2.8-9b 为模锻前模具在合模力 F_{he}的作用下，两半凹模被紧紧地压在一起。由于推杆和两半凹模均系弹性元件，在合模力 F_{he}作用下，推杆产生了弹性压缩变形 λ_t ($\lambda_t = L_1 - L_2$)，凹模产生了弹性压缩变形 λ_a；图 2.8-9c 为模锻时，模具在张模力 F_{zh}的作用下，使推杆又被压缩了 $\Delta\lambda$，而凹模却减少了（松弛）$\Delta\lambda$ 的变形量。

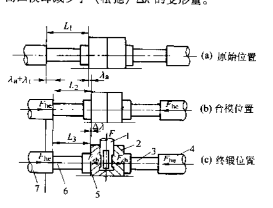


图 2.8-9　垂直分模多向模锻过程简图

1—凸模；2—右凹模；3—右推杆；4—右柱塞；5—左凹模；6—左推杆；7—左柱塞

力-弹性变形关系图如图 2.8-10 所示。在此图中，纵向表示力，横向表示弹性变形，每种力都对应着它在压紧机构中的弹性变形量。由图 2.8-10 可知，推杆总压缩量为 $\lambda_t + \Delta\lambda$，凹模余下的压缩量为 $\lambda_a - \Delta\lambda$。此时，作用于凹模接触面上的合模力由 F_{he}减小到 F'_{he}，F'_{he}称为作用在凹模接触面上的残余合模压力。由此可见，当 $F'_{he} < F_{zh}$时，就易产生开模现象。

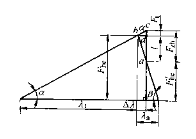


图 2.8-10　推杆、半凹模力-弹性变形图

由图 2.8-10 可得出：

$$F_{he} = F_{zh} + F'_{he} - F_t \tag{2.8-1}$$

$$F_{zh} = F_t + l \tag{2.8-2}$$

在△bcd 中

$$bd = \frac{F_{zh}}{\tan\alpha} \tag{2.8-3}$$

在△abd 中

$$l = bd\tan\beta \tag{2.8-4}$$

将式 (2.8-3) 代入式 (2.8-4) 得：

$$l = \frac{F_t\tan\beta}{\tan\alpha} \tag{2.8-5}$$

将式 (2.8-5) 代入式 (2.8-2) 得：

$$F_{zh} = F_t + \frac{F_t\tan\beta}{\tan\alpha} = F_t\left(\frac{\tan\alpha + \tan\beta}{\tan\alpha}\right)$$

或

$$F_t = \frac{F_{zh}\tan\alpha}{\tan\alpha + \tan\beta} \tag{2.8-6}$$

$$\tan\alpha = \frac{F_{he}}{\lambda_t} = C_t$$

$$\tan\beta = \frac{F_{he}}{\lambda_a} = C_a$$

式中，C_t、C_a 为推杆和半凹模的刚度系数。

所以式 (2.8-6) 可写成：

$$F_t = \frac{Z_{zh}C_t}{C_a + C_t} \tag{2.8-7}$$

将式 (2.8-7) 代入式 (2.8-1) 得：

$$F_{he} = F'_{he} + \frac{F_{zh}C_a}{C_a + C_t} \tag{2.8-8}$$

在张模力 F_{zh}的作用下，为防止开模，在两半凹模的接触面上必须有足够的残余合模压力 F'_{he}。当 $F'_{he} \geq F_{zh}$时，就能保证不开模。因此，当取 $F'_{he} = F_{zh}$时，则由式 (2.8-8) 可得出所需合模力：

$$F_{he} = F_{zh}\left(1 + \frac{C_a}{C_a + C_t}\right) \tag{2.8-9}$$

当 C_a 比 C_t 小很多时，即推杆的刚度很大时，由式 (2.8-9) 可得：$F_{he} = F_{zh}$，即所需合模力等于张模力。反之，当 C_t 比 C_a 小很多时，即推杆的刚度很差，则由式 (2.8-9) 可得：$F_{he} = 2F_{zh}$，即所需合模力等于两倍的张模力。由此可见，垂直分模时，合模力一般为张模力的 1～2 倍，这取决于推杆的刚度。

水平分模时，由液压机的活动横梁压紧模具，它相当于垂直分模时水平推杆的作用，因其刚度远远大于推杆的刚度，此时合模力等于张模力 ($F_{he} = F_{zh}$)。此外，多向模锻液压机垂直方向的作用力一般均大于水平方向的作用力，这样更易压紧凹模。

4　多向模锻件图设计

多向模锻件设计的基本原则与普通模锻件的基本相同，

但根据锻件外形及成形的特点仍有所不同，现分述如下：

（1）分模面的选择

选择分模面的原则主要是锻件要容易脱模，金属要易于充满型腔。分模面有垂直、水平之分，它们分别如图 2.8-11 和图 2.8-12 所示。当锻件形状复杂，采用水平或垂直分模不能使锻件出模时，则必须采用垂直与水平联合分模或特殊分模方式，如图 2.8-13 所示的球形接头锻件即采用垂直与水平联合分模、垂直分模面选在 *B*—*B* 剖面，在两水平接头的中心线以下（见图中 *C* 向视图的 *O*—*L* 线）。水平分模面选在两个水平接头的水平中心线并逐渐过渡到方形法兰的下边缘（见图中 *C* 向视图的 *ABCDEF* 线）。燃油泵壳体锻件更为复杂，采用三向垂直分模的特殊方式，如图 2.8-14 所示。

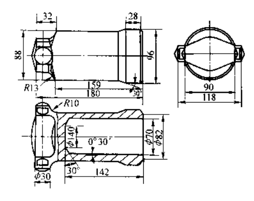


图 2.8-11　大外筒锻件图

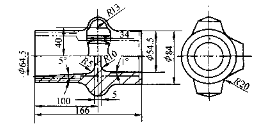


图 2.8-12　下套筒零件图

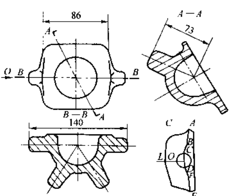


图 2.8-13　球形接头锻件图

1）模具的组合。多向模锻的模具有多个分模面，模具分为多块。单块制造比较简单，但是要将多块模具组合起来，形成封闭模膛并保证其尺寸精度，必须在分模面的选择上使模具易于组合。

2）凹模夹紧力的选择通常由于凹模对坯料的夹紧力大于冲头对坯料的成形力，因此，在一般情况下应将锻件的最大投影面置于压紧力的作用下，即把压紧力设计在热模锻压力机的滑块或液压机的主液压缸的作用下。

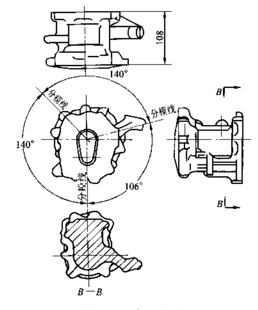


图 2.8-14　壳体锻件图

3）分模面的布置。应尽量使锻件相对于分模面对称分布，对于凸台、凸肩及枝芽部分尤为重要。应避免曲面分模。

4）孔中心线的布置。多向模锻锻件多为单孔、双孔或多孔型，应尽量使孔的中心线在水平方向，设计为挤压或镦挤变形状态。

（2）余量和公差

多向模锻锻件，尤其是一些中小型件，一般采用闭式精密模锻成形，锻件的余量和公差可以达到很精密的程度，所以，余量和公差的确定可以尽量减小机械加工的切削加工量。在感应加热或少无氧化加热的情况下，多向模锻件的公差可达 0.075 mm 的精度。通常，大型多向模锻锻件的余量和公差可按 GB/T 12362—1990 普通级精度选择。中小型锻件的余量和公差可按 GB/T 12362—1990 精密级选择。对于中小型锻件的余量和公差也可按普通级相应值的一半选取。

（3）圆角半径

圆角半径的大小对多向模锻有很大的影响。圆角半径太小，则金属流动时的变形阻力大，不利于成形。但外圆角半径太大时，这些部位上的加工余量将减小。内圆角半径太大，则增加加工余量。因此，必须合理选用圆角半径。多向模锻件圆角半径可按锤上模锻圆角半径的 1/2 ~ 1/4 选用，或按表 2.8-3 确定。

表 2.8-3　多向模锻锻件圆角半径　　mm

孔深 *L*	外半径 R_1	内半径 R_2
~5	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6
5 ~ 10	1.0 ~ 1.5	0.8 ~ 1.0
10 ~ 15	1.5 ~ 2.5	1.0 ~ 1.5
15 ~ 25	2.5 ~ 3.0	2.0 ~ 2.5
25 ~ 40	3.0 ~ 4.0	2.5 ~ 3.0
40 ~ 80	4.0 ~ 4.5	3.0 ~ 3.5
80 ~ 120	4.5 ~ 5.5	3.5 ~ 4.0

（4）模锻斜度

多向模锻可以实现无模锻斜度或小斜度模锻。如喷管锻件（图 2.8-15）就是利用其径向半圆弧作外斜度，内孔则利用其自然斜度，两端面则是无斜度。因此整个锻件设计没有

外加的模锻斜度。对于筒形锻件（见图 2.8-11），当孔深小于 1.5 倍孔径时，可采用无斜度，当孔深等于 1.5～2.5 倍孔径时，可采用 0°30′的斜度。深孔模锻斜度要视成形的方式而定。开式反挤压成形（图 2.8-16）仅有反挤压变形、不须设计模锻斜度；闭式反挤压成形（图 2.8-17）除了反挤压变形外，两端的圆台及凸台进行镦粗变形，形成闭式反挤压，根据经验，模锻斜度可取 0°30′～1°，此外还要有良好的润滑并采用效果良好的脱模剂。

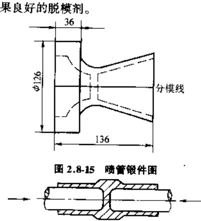


图 2.8-15 喷管锻件图

图 2.8-16 开式反挤压成形

图 2.8-17 闭式反挤压成形

1—锻件；2—冲头；3—上半凹模；4—下半凹模

(5) 连皮设计

对通孔筒形锻件一般采用水平分模两向挤压方法，将通孔挤成两个不通孔，两孔之间有一层适当的连皮，如图 2.8-18 所示。连皮的厚度太薄，不仅使水平工作缸压力增大，而且还可能造成水平工作缸自相撞击。若连皮太厚，则增加材料和加工工时的浪费。合理的连皮厚度一般可按下式计算：

$$t = (0.1 \sim 0.2)\ d$$

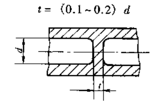


图 2.8-18 连皮厚度的计算

连皮的位置根据零件形状而定，如图 2.8-12 所示的下套筒锻件，筒体外有三个凸耳，为了有利于三个凸耳的成形，连皮设计在三个凸耳的垂直中心线上。又如喷管锻件（图 2.8-15），其连皮设计在内孔直径最小处。此外，设计连皮时，为避免连皮切除后流线末端外露，可加大其厚度，同时连皮的位置要避免选在零件受力的危险断面上。

(6) 空心锻件的内腔设计

图 2.8-19 所示为一空心锻件的一部分，孔腔尺寸可参照下列关系式确定：

$$L < 5d$$
$$D \geq 1.2d$$
$$h = 0.12d$$
$$\beta = 10° \sim 30°$$

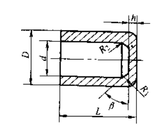


图 2.8-19 内腔尺寸的设计

R_1、R_2 按表 2.8-3 选取。

5 多向模锻模具设计

5.1 模具设计要点

1) 要考虑压力机的结构和特性，如压力机的刚性、下横梁的弹性变形量、有无上穿孔柱塞等以便确定模具的结构和具体设计。

2) 对于模座和模具的固定形式，要考虑两个水平柱塞不同步时所产生的剪力使模座错移和模具损坏的可能性。

3) 模具要便于安装和调整，特别是水平夹座和水平分模时冲头和上下凹模的安装和调整。

4) 当锻件需要垂直分模而水平柱塞的压模力不足时，可以在凹模外侧加套圈，以便箍紧凹模。套圈内壁与凹模外圆的配合要有斜度，斜度的大小要设计适宜。

5) 多向模锻以挤压成形为主，模具型面的磨损比较严重，因此设计冲头和凹模时要选用红硬性好、耐磨损的模具材料。并且要求硬度高和表面粗糙度小。

6) 凹模设计要充分利用多向分模面的特点，对形状复杂的锻件尽量采用镶块及活动块，既便于制造，又便于安装。

① 对于外形比较简单的筒形件，设计凹模时，在拔出冲头方向的凹模型槽端部要设计承剪面，以防止拔出冲头时锻件也被拔出模体之外。图 2.8-20a 的设计是错误的，其结果是在拔出冲头时将锻件的两个凸耳拉弯变形（见图 2.8-20b)。正确的设计应如图 2.8-20c 所示那样，将导向部分的孔径减小，在型槽上端设计了承剪面。

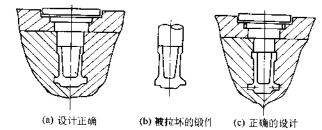


图 2.8-20 凹模模膛的正确设计

② 对于模膛位置的安排要考虑张模力和压模力中心尽可能重合或相互接近，否则，将会使凹模张开而产生飞边。

③ 根据变形金属充满模膛的情况，在靠近最后充满的地方设置多余金属分流腔，同时也起到降低模膛内部压力的作用。

5.2 模具结构设计

(1) 结构形式

多向模锻模具结构的基本形式和分模方式一样，有水平分模、垂直分模和联合分模三种结构。此外，根据锻件形状和设备条件，可设计特殊结构形式的模具。

1) 水平分模模具结构。水平分模模具的分模面与水平面平行，如图 2.8-21、图 2.8-22 所示。水平分模模具中的锻

件成形主要靠水平工作柱塞的两向挤压、两块凹模分别用楔形压板螺钉固定在上，下模座上，两个水平冲头分别装在液压机的两个水平柱塞的夹座上，其对中由冲头导向部分和上、下模闭合的导柱、导套来保证。

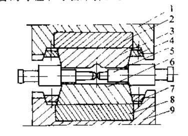


图 2.8-21　下套筒模具结构

1—上模座；2—上垫板；3—上凹模；4—上压板；5—冲头；6—下凹模；7—下压板；8—下垫板；9—下模座

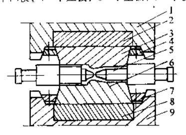


图 2.8-22　喷管模具结构

1—上模座；2—上垫板；3—上凹模；4—上压板；5—冲头；6—下凹模；7—下压板；8—下垫板；9—下模座

2）垂直分模模具结构。垂直分模模具的分模面与水平面垂直，锻件的成形主要靠液压机的垂直柱塞向下挤压，如图 2.8-23 所示，两个水平推杆的一端装在水平工作缸的柱塞夹座上，另一端用销钉与凹模连接，推动两半凹模在底板上运行，使模具开合，并依靠底板中心的定位块定位，使冲头与凹模型腔中心一致。两半凹模应有导销，以防止错模。

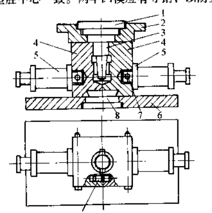


图 2.8-23　垂直分模模具结构

1—上垫板；2—夹座；3—冲头；4—半凹模；5—推杆；6—底板；7—销钉；8—定位块；9—导销

3）联合分模模具结构。模具有垂直分模面和水平分模面时称为联合分模，其结构形式如图 2.8-24 所示，它由左右两块下凹模组成垂直分模、并与上凹模组成水平分模，构成垂直与水平联合分模结构。在上凹模的中心开有一个为冲头进行挤压的导向孔。

联合分模的模具结构如图 2.8-24 所示。其工作原理是：压力机的两个水平柱塞连接推杆 2，推动左右半模 3 沿底板 15 上的燕尾槽向中心滑移，推杆是用销杆 12 和半模连接的。半模滑移的终点由埋装在底板中心的圆柱形定位块 1 控制。定位块除了起定位作用外，还帮助导销 16 防止两个半模错移。上模 5 的中心部位设置有部分型槽，它与左右半模用 3° 斜度配合的圆形凸台也起着防止左右半模错移的作用。不过，凸台的主要作用还是帮助水平推杆 2 压紧左右半模，以防止两个半模张开而产生飞刺。上模 5 借助于安装在冲头压板 6 上的四个强力弹簧 10 压紧左右半模，上模和左右半模内的型槽相对位置依赖于压装在左右半模的定位销 4 来保证。冲头压板 6、弹簧 10 及上模 5 都由起弹簧心轴作用的拉杆 9 和螺母 11 连接。冲头压板 6 除装配冲头 7 和垫板 8 之外，还起止程作用，当它的下平面压紧上模的上平面时，压力机的活动横梁便停止向下运动，工作行程即告终止。整套模具的上下部分用螺钉、螺母分别固定在压力机活动横梁和底座上。

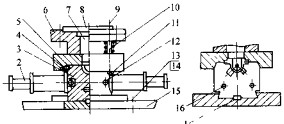


图 2.8-24　联合分模模具结构

1—定位块；2—推杆；3—左右半模；4—定位销；5—上模；6—冲头压板；7—冲头；8—垫板；9—弹簧拉杆；10—弹簧；11—拉杆螺母；12—销杆；13—螺钉；14—螺母；15—底板；16—导销

4）特殊结构模具。特殊结构模具是指采用水平分模、垂直分模和联合分模结构都不能满足锻件成形需要或用于弥补设备功能不足而设计的模具。如燃油泵壳体模具（见图 2.8-25）就是如此。根据锻件图的要求，模具型腔需有三块凹模和一个冲头组成。三块垂直凹模间的分模面角度为 114°、106°、140°。这就要求在水平方向上具有三个可调整角度的工作柱塞的液压机开合这三块凹模。而目前液压机只有两个水平柱塞。为此，设计一个叉形推杆，使一个水平柱塞通过叉形推杆推动两块凹模开合。同时，另一个水平柱塞也推动另一块凹模向底板中心运动，使三块垂直凹模在两个水平柱塞推动下同时向中心运动，直至三块凹模相互压合为止。此外，由于两个水平柱塞的合模力不足，在凹模外缘增设了一个套圈，使套圈承受一定的张模力，以弥补水平合模力不足。

上述四种多向模具结构中，水平分模结构是应用最多的一种，锻件两端具有深孔时多采用水平分模结构。锻件一端有深孔时可采用水平分模，也可以采用垂直分模。假如锻件尺寸较大，需要较大的合模力时，宜采用水平分模。这是由于多向模锻液压机垂直工作缸压力一般大于水平工作缸的压力，可获得较大的合模力。当锻件需要有三块或四块凹模在一个平面上开合时，一般采用垂直分模，也可采用叉形特殊结构。

（2）模膛位置

1）在安排模膛位置时，要注意张模力的中心往往不等于模具几何形状的中心，要注意使模膛的张模力中心接近合模力中心，以免造成局部张模而产生飞刺。如图 2.8-26a 所示为垂直分模模膛安排不当的情况，这时模具下半部张模，出现飞刺。若将模膛向上移动一定距离，如图 2.8-26b 所示，就可避免张模。如图 2.8-27a 所示为水平分模模膛位置安排不当的情况，这时模具右半边先张模，产生飞刺。若把模膛向左边移动一些，就不会张模，从而可解决产生飞刺的问题，如图 2.8-27b 所示。



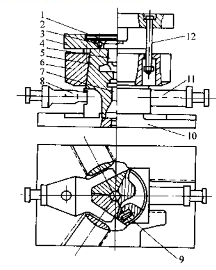


图 2.8-25 燃油泵壳体模具结构图
1—垫板；2—定位销；3—上模板；4—冲头；
5—半凹模；6—套圈；7—定位块；8—叉形推杆；
9—导销；10—底板；11—水平推杆；12—拉杆

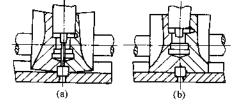


图 2.8-26 垂直分模模膛安排示意图

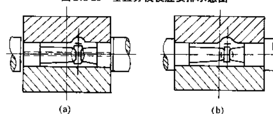


图 2.8-27 下套筒模膛位置安排示意图

2）模膛的布置要有利于锻件的成形，尤其对非对称的、形状复杂的凸台或枝芽状的多向模锻件更为重要。如小外筒锻件按图 2.8-28a 的布置形式，将二个圆形凸耳放在外端，则凸耳是在挤压变形接近终了时，靠水平冲头进行反镦挤成形的，这样难以充满模膛。如果按图 2.8-28b 的布置形式，二个凸耳布置在挤压冲头行程终止位置，则较易于充满模膛。

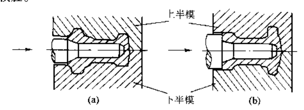


图 2.8-28 小外筒锻件模膛布置

(3) 模具导向装置

定位与定中心对于保证多向模锻件尺寸精度特别重要。为了使凹模运动具有良好的导向性，确保组合后互相对准中心，一方面模具配合面的设计要能使其起定位作用，同时还必须在模具上设置导向部分，以防止错模。一般采用圆柱形导销，将导销以热压配合压入一块模具，另一块模具上加工出导向孔（或用导套压入导向孔），它们之间的间隙为 0.5 mm。一般模具设置二个导销，如图 2.8-29 所示。当模具是由三块凹模组合时，可采用如图 2.8-30 所示的导向形式，导销可以为圆柱形，与它配合的是一个导槽。

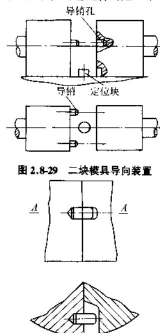


图 2.8-29 二块模具导向装置

图 2.8-30 三块模具导向装置

(4) 凹模导向

凹模导向的设计要有足够长的导孔，以保证水平冲头在模锻过程中具有一定的同心度。

1）导向的基本形式。图 2.8-31 为凹模导向部分的一种形式。锻件变形终了时，多余金属将沿直径方向产生横向毛刺，这种毛刺清理比较困难，应尽量避免采用这种形式。

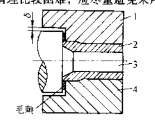


图 2.8-31 产生纵向毛刺的凹模导向
1—上凹模；2—锻件；3—冲头；4—下凹模

凹模导向部分的另一种形式如图 2.8-32 所示。当有多余金属时，将流向直径外圆周，产生纵向毛刺，较易于清理。

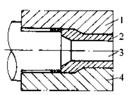


图 2.8-32 产生纵向毛刺的凹模导向
1—上凹模；2—锻件；3—冲头；4—下凹模

2）冲头与凹模间的间隙。冲头进入凹模部分要有一定的间隙，如图 2.8-33 所示。

影响间隙 δ 的主要因素有：水平工作缸的同轴度、凹模高度及工作台高度上的精确程度、活动横梁的变形量及模

具弹性变形量、冲头安装中的错移量等。

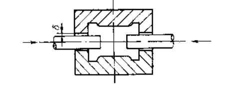


图 2.8-33 冲头进入凹模处的间隙

(5) 深孔锻件凹模的设计

对于深孔锻件，冲头从深孔中拔出时需要有一定的拔模力，这时要考虑拔出冲头时锻件可能会变形。如图 2.8-34a 所示，当冲头拔出时会使锻件下部的二个凸耳变形。因此，锻件与型腔之间一定要有足够的承剪面，如图 2.8-34b 所示，这样冲头拔出时，锻件就不会拉断或变形。

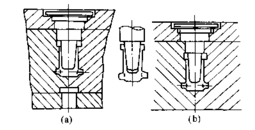


图 2.8-34 深孔锻件的承剪面

(6) 冲头设计

冲头的形状应根据锻件的内孔形状而定，但冲头工作部分的形状对压力有很大影响。多向模锻常用的冲头形式如图 2.8-35 所示。图 2.8-35a 为带斜角的平冲头，能降低工作压力，且工作稳定可靠。图 2.8-35b 为球形面冲头，产生横向分力，变形力较大，应尽量少用。图 2.8-35c 为平头冲头，变形量小时可采用。图 2.8-35d 为锥形冲头，稳定性较差。

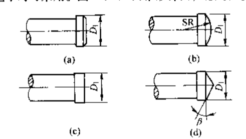


图 2.8-35 多向模锻的冲头形式

在封闭式多向模锻中，冲头最好使用如图 2.8-35a 所示的形式。这种冲头稳定性好，变形力较小，也有利于金属流动。冲头工作部分的尺寸参数可按下列各式计算选定（图 2.8-36）：

$$D_1 = d + \alpha d + \frac{\Delta}{3}$$

式中，d 为锻件内径；α 为线性冷缩系数；Δ 为锻件内径上的公差。

$$D_0 = (0.5 \sim 0.7)\ D_1$$

$$h = 4 \sim 14\ \text{mm}$$

$$r = \frac{h}{4}$$

$$D_2 = D_1 - 0.4 \sim 0.8\ \text{mm}$$

$$R = 1 \sim 4\ \text{mm}$$

$$\beta = 10° \sim 30°$$

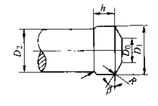


图 2.8-36 冲头工作部分尺寸设计

(7) 推杆设计

在垂直分模结构中，推动凹模的水平推杆要有足够的刚度，压模效果好，锻件就不产生飞刺。当推杆刚度不足时，推杆容易变形，对合模不利，有可能产生飞刺。

(8) 通气孔设计

对外形复杂的锻件，如有局部封闭型腔（图 2.8-13 中 $A—A$ 剖面上的接头），应在型腔底部设计通气孔，如图 2.8-37a 所示，但这时锻件充满和脱模都较困难。若设计成如图 2.8-37b 所示的顶出结构，则通气效果好，锻件易于充满，脱模也方便。

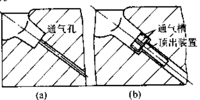


图 2.8-37 球形接头模具的通气孔和顶出装置

(9) 水平夹持器设计

大型多向模锻液压机的水平夹持器可采用气动夹紧结构。中小型多向模锻设备的水平夹持器如图 2.8-38 所示，冲头通过压紧螺母与螺杆连接，冲头与螺杆之间有一块垫铁。这种结构装卸不方便，在工作过程中稳定性差，冲头易产生偏斜，会使深孔型锻件产生较大的壁厚差。

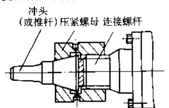


图 2.8-38 螺母式水平夹持器结构

目前大都采用压块螺栓夹持器结构形式，如图 2.8-39 所示，把冲头的尾柄放入夹座体凹腔内，将压块合上，压住尾柄，上紧螺母使冲头固定。这种结构比较简单，且装卸方便，紧固性也好。

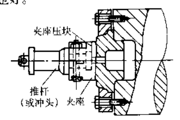


图 2.8-39 压块螺栓夹持器结构

6 多向模锻压力机

多向模锻压力机分液压传动和机械传动两种形式，大中型多向模锻压力机一般采用水压传动，小型多向模锻压力机既有采用油压传动，也有采用机械传动的。小型多向模锻压力机放在本章最后结合工艺和模具一起介绍，本节以四工位

多向模锻液压机为例着重介绍大中型多向模锻水压机。

(1) 基本结构

图 2.8-40 为四工位多向模锻液压机示意图。这台多向模锻液压机本体结构为三梁（上梁、下梁及活动横梁）四柱式，三个垂直工作缸均以台肩支承固定于上梁 2 上，其柱塞下端与活动横梁 3 连接。两个回程缸分别装在上梁 2 的两侧，通过四根拉杆 1 的提升活动横梁。上工作台 4 借燕尾配合用螺栓固定在活动横梁 3 下面，台面另设有燕尾槽和 T 形槽用以固定垫板或模具。两个水平缸 5 和四个回程缸（两个水平缸各配两个回程缸）均以台肩支承，分别固定于下梁 8 的两悬臂上，模具可直接通过螺栓固定在水平柱塞上，其回程是由缸底方向通过拉杆向后拖动柱塞。下工作台 7 安装在下梁 8 上平面凸出的 V 字形挡块和条形挡块之间，并用斜楔和螺栓等紧固。

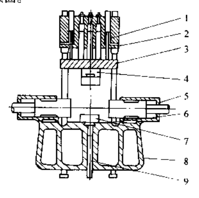


图 2.8-40　四工位多向模锻液压机示意图

1—拉杆（四根）；2—上梁；3—活动横梁；
4—上工作台；5—两侧水平工作缸；6—立柱（四根）；
7—下工作台；8—下梁；9—顶出装置

(2) 传动原理

图 2.8-41 是四工位多向模锻液压机的传动原理图。水平缸柱塞空程相对运动时，低压水由充水箱 4，经充水阀 3，进入水平工作缸 1 和 2 内，这时水平回程缸 5 及 6 的水，经分配器 7 排入水箱 8 中。

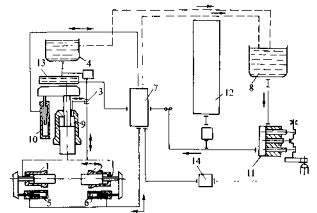


图 2.8-41　四工位多向模锻液压机的传动原理

1、2—水平工作缸；3—充水阀；4—充水箱；
5、6—水平回程缸；7—分配器；8—水箱；
9—垂直工作缸；10—垂直回程缸；11—高压泵；
12—蓄能器；13—低压补偿器；14—高压缓冲器

垂直工作缸空程向下时，情况相同。低压水由充水箱 4，经充水阀 3，进入垂直工作缸 9 内，这时回程缸 10 的水经分配器 7 排入水箱 8 中。由于充水箱 4 与多向模锻液压机有一段较长距离，液压机空程向下速度较快，低压水须及时供应，此时，低压补偿器 13 的低压水，将自动流入工作缸。

当垂直缸和水平缸的模具与加热好的毛坯接触后，高压泵 11 及蓄能器 12 供给的高压水经分配器 7 进入工作缸内，工作行程开始。压力机停止工作时，高压泵 11 打出的高压水则储存于蓄能器中。管道中水力冲击较大，用高压缓冲器 14 予以消除，保证液压机稳定工作。两个水平缸可以相对运动，也可以单独一个运动，可以在垂直工作缸上的上模与下模闭合后再动作，从而满足多向模锻工艺的要求。

(3) 水平工作缸

多向模锻液压机各水平工作缸压力一般设计为垂直主缸压力的 1/4～1/2。水平工作缸压力以多级式最为节省。水平工作缸的同步性对锻件质量有很大影响。

1) 同步性。水平工作缸的工作行程异步，对于加工对称形零件，则先接触坯料的冲头将坯料推向慢的一边，造成金属分布超差。料多的一端在变形金属充满模膛后还会产生非设计需要的飞边；而另一端会因料少而使锻件相应部分未充满。回程异步会造成拔模速度不一致，未充满的一端比充满的一端的卸件力小得多，冲头能顺利的先退回；而充满的一端，卸件力较大，加上飞边和温差等因素的影响，甚至会发生拉断锻件或损坏冲头等现象。

2) 同心度。两个水平工作缸的同心度是保证多向模锻件壁厚均匀的重要因素。为了达到设计要求，同心度除了在设计和制造多向模锻液压机时给予保证外，正确安装水平冲头与水平工作缸的柱塞也是重要环节。

3) 水平工作缸同步操作原理。水平工作缸同步操作原理如图 2.8-42 所示。为了保证水平工作缸 8 和 9 同步，在液压管道系统上安装了充液阀、节流阀、电磁分配阀及行程限位开关等元器件进行调节控制。高压水进入充液阀 1 后，流向水平工作缸之前，先经过管道上的节流阀 2 和 3 起到初调同步的作用。节流阀 2 和 3 分别由电磁分配阀 6 和 7 控制。当多向模锻液压机某一水平工作缸柱塞超前时，就首先碰上预先调整好的（水平冲头刚好与工件相接触）限位开关 4 或 5，当反映到电磁分配阀 6 或 7 后，使节流阀 2 或 3 关闭。当两个柱塞上的模具或冲头都达到同一进度要求时，可按动操作手柄上的按钮，两阀均开，再把手柄推到加压位置即可。另外，当工艺要求某一水平缸单独工作时，可在操纵台上通过转换开关任意选择。

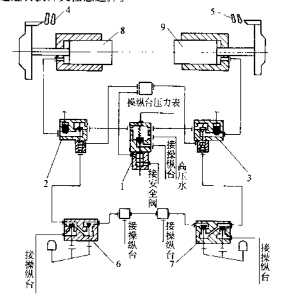


图 2.8-42　水平工作缸同步操作原理

1—充液阀；2、3—节流阀；4、5—限位开关；
6、7—电磁分配阀；8、9—水平工作缸

表 2.8-4 为国内、外多向模锻水压机主要技术规格。

表 2.8-4 国内外多向模锻水压机主要技术规格

公称压力/kN			8 000	20 000	36 000	45 000	72 000	100 000	100 000	180 000	300 000
工作液体压力/MPa			32	31.5	31.5			32	38.5～56		42.2
各缸的公称压力/kN	垂直缸	一级	2 700								
		二级	5 400								
		三级	8 000								
	水平缸		2×5 000		2×18 000	2×18 000	2×9 000	2×35 500/50 000	2×55 000	2×45 000/680 000	2×60 000
	穿孔缸							2 400	27 000	38 000	60 000
最大行程/mm	垂直缸		800	1 500	1 140			1 600		2 380	3 048
	水平缸		500	850	610			900	610		1 067
	穿孔缸							210	610		1 067
顶出器压力/kN			500	750			4 500	5 000	6 800	5 900	12 000
顶出器行程/mm			200					500			2 133
闭合高度/mm	垂直			2 100	2 300			3 660	4 580		
	水平							4 730			
工作台面尺寸（长/mm×宽/mm）			1 000×1 300	1 500×1 500	2 300×1 300		2 430×1 830	3 000×3 500	3 050×3 050	3 660×3 360	
地面上高度/mm			6 760	10 925	11 700			12 800	总高 18 600	总高 15 200	总高 14 600

7 多向模锻实例

下面列举所用设备是 8 000 kN 四工位多向模锻水压机。该压力机为三梁四柱结构。在上横梁有三个垂直工作柱塞，垂直压力可分 3 200 kN、6 400 kN 和 9 600 kN 三级。但是没有单独动作的垂直上穿孔柱塞。在下横梁的两侧装有两个水平工作柱塞，其压力各为 4 600 kN。工作台面尺寸为 1 000 mm×1 300 mm。水平柱塞的中心线距离工作台面的高度为 150 mm。

（1）下套筒多向模锻工艺及模具

下套筒是飞机上的一个零件，材料为 40CrNiMoA，锻件图如图 2.8-43 所示。该锻件为一通孔型构件，但两端孔径不一，因此采用水平分模两向挤压工艺。

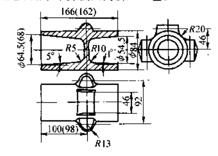


图 2.8-43 下套筒锻件图

1）模具结构为水平分模结构，如图 2.8-22 所示。

2）凹模（如图 2.8-44 所示）。

① 模块。根据锻件的外形尺寸和设备要求，设计成宽 350 mm，长 400 mm、厚 150 mm 的模块（模块的厚度——特别是下模块的厚度是根据压机水平柱塞的中心线距离工作台面的高度而设计的）。在模块长度方向两侧的底部，设计成高 72 mm、斜度为 10°的斜面，作为与压板的配合面，用螺钉固定在模座上。

② 型槽位置的安排。经过分析，型槽的张模力中心在锻件三个凸耳的中心线上，因此，将型槽的位置向左移动，使三个凸耳的中心线尽量靠近模具的中心线，两者之间相距只有 7.4 mm。

③ 导销装置。为了防止错模，在上下凹模的对角线上各设计了两个直径为 45 mm 的导销孔。导销（见图 2.8-45）压装在下凹模的导销孔中。

3）冲头。冲头的柄部是根据水平夹座的尺寸设计的。左冲头工作部分的端部设计成弧形的（见图 2.8-46）。采用 5°的斜度是因零件内孔有阶梯，在锻件设计时用斜度连接成一个斜孔。右冲头的斜度为 0°45′，端部也是弧形的，如图 2.8-47 所示。

（2）缸体多向模锻工艺及模具

1）缸体多向模锻工艺。缸体多向模锻锻件图如图 2.8-48a 所示，锻件左端大，右端小，外端凸台多、大小不均且沿锻件轴线分布不对称，为了有利于凸台充满成形，故两端冲孔孔径大小和深度不等。

① 原毛坯重量。采用 ϕ100 mm 的棒料，下料长度为 141 mm，其重量为 8.7 kg，因火耗和少量的毛刺，比理论重量约大 3%。

② 毛坯形状和尺寸。由于水压机两水平侧缸空程时不同步，若直接采用棒料毛坯则很容易使毛坯串动。将棒料毛坯压扁，翻转 90°放入模膛，当上凹模与下凹模闭合时可使毛坯产生较大的局部变形，这样毛坯不会发生左右串动。

③ 毛坯放入模膛中的合理位置。经压扁的毛坯不能随意放入模膛中，必须将坯料一端紧靠模膛的小端。这样，在两个水平冲头作用下大端的金属不能流向小端而迫使凸台模膛首先充满成形，然后使大端成形。

2）模具结构。模具结构如图 2.8-48b 所示，上、下凹模固定在通用模架上，采用两块梯形压板通过螺钉紧固. 为了

防止锻件错移和便于调整模具，上、下模设置有导向装置。模具的前后方向可以自由调整，左右和高度方向可以通过垫片调整。冲头采用压块压住尾柄固定方向（图 2.8-39）。通过模具上的机械限位来限制冲头的挤压行程。

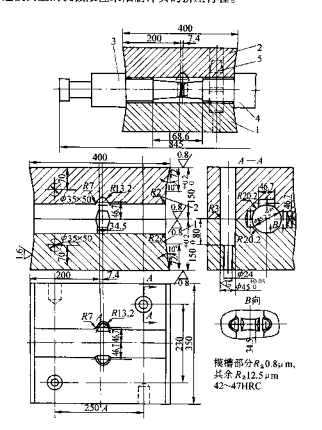


图 2.8-44　下套筒凹模

1—下模；2—上模；3—左冲头；4—右冲头；5—导销

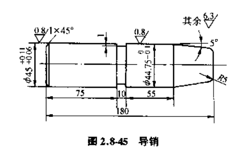


图 2.8-45　导销

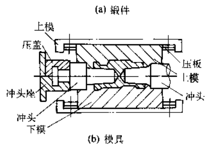
图 2.8-46　左冲头

（$\phi 60_{-0.1}^{0}$ mm与工作部分同轴度小于0.1 mm）

图 2.8-47　右冲头

（$\phi 60_{-0.1}^{0}$ mm与工作部分同轴度小于0.1 mm）

(a) 锻件



(b) 模具

图 2.8-48　缸体多向模锻

编写：夏巨谌（华中科技大学）

第9章 精密模锻

1 精密模锻工艺的特点及应用

1.1 精密模锻工艺的特点

精密模锻工艺是在普通模锻的基础上发展起来的一种少无切削新工艺，属于先进制造技术的重要组成部分，也是锻压技术的发展方向之一。

与普通模锻相比，精密模锻的主要优点是：机械加工余量少甚至为零；尺寸精度较高，即精密模锻件的尺寸误差比普通模锻件的尺寸误差小，一般仅为普通模锻件误差的一半，甚至更小；表面质量好，即精密模锻件的表面粗糙度较低，表面凹坑等缺陷和切边后留下的残余飞边宽度限制更严等。

与切削加工相比，精密模锻的主要优点是：因锻件毛坯的形状和尺寸与成品零件接近甚至完全一致，因而材料利用率高；因精密塑性成形，金属纤维的分布与零件形状一致，因而使零件的力学性能有较大的提高等。所以，精密模锻也称少无切屑工艺。

一般模锻件所能达到的尺寸精度为 ±0.50 mm，表面粗糙度也只能达到 R_a12.5，而精锻件所能达到的一般精度为 ±0.10～±0.25 mm，较高精度为 ±0.05～±0.10 mm，表面粗糙度可达 Ra3.2～0.8 μm。例如，用精密模锻生产的直齿圆锥齿轮，齿形不再进行机械加工，齿轮精度达到七级；精锻的叶片，轮廓尺寸精度可达到 ±0.05 mm，厚度尺寸精度可达到 ±0.06 mm。据粗略计算，每 100 万吨钢材由切削加工改为精密模锻，可节约钢材 15 万吨（15%），减少机床 15 000 台。表 2.9-1 列出了一些精密模锻件的技术经济效果。

表 2.9-1 一些零件的精密模锻与普通模锻生产的技术经济效果比较

比较项目 / 零件名称	材料利用率		生产率	产品质量	备注
	普通模锻	精密模锻			
行星锥齿轮	37%	80%	提高 2.3 倍	提高力学性能	在摩擦压力机上精锻
驱动齿轮（直齿圆柱锥轮）	—	提高一倍	提高 10 倍	提高力学性能	在高速锤上精锻
轧钢机辊道锥齿轮	43.3%	64%	提高 12 倍	提高力学性能	—
汽轮机叶片	—	比普通模锻节约材料 60%	机械加工工时减少 40%	—	在模锻锤上精锻
BT-100 型汽轮机 16 级工作叶片	29%	46%	机械加工工时减少 40%	—	在模锻锤上精锻
千斤顶顶盖	53%	80%	机械加工工时减少 50%	—	在摩擦压力机上精锻
阀瓣	—	比切削加工节约材料 64%	提高 10 倍以上	—	在机械压力机上精锻
盒形接头（航空锻件）	12.6%	47.5%	机械加工工时节约 76.5%	改善了疲劳性能和抗应力腐蚀性能，提高了使用寿命	在液压机上等温精锻
支臂（航空锻件）	29.1%	45.1%	机械加工工时节约 86.2%	改善了疲劳性能和抗应力腐蚀性能，提高了使用寿命	在液压机上等温精锻
接头（航空锻件）	10.24%	71.9%	机械加工工时节约 80.6%	改善了疲劳性能和抗应力腐蚀性能，提高了使用寿命	在液压机上等温精锻

1.2 精密模锻工艺的应用

目前，精密模锻主要应用在两个方面：一是精化毛坯，即利用精锻工艺取代粗切削加工工序，将精密模锻件直接进行精加工而得到成品零件，如齿轮坯、叶片、小型连杆、管接头、中小型阀体、中小型万向节叉、十字轴、轿车等速万向节零件等均属于这一类，是目前的主要应用方面；二是精锻零件，即通过精密模锻直接获得成品零件，迄今，完全通过精密模锻获得成品零件的实例尚少，仅是一些简单零件和尺寸精度要求不是很高的零件。但对于一些关键零件，将其形状复杂难于切削加工的部分进行精密模锻成形，而其余部分仍采用切削加工。如齿轮的齿形、叶片的叶身等直接精锻成形或仅留抛光余量，而花键槽、叶根等仍采用切削加工。这种精锻与切削加工相结合的方法，其应用越来越广泛。精密模锻工艺的发展趋势是，由接近形（near net shape of productions）向净形（net shape of productions）发展。

精密成形工艺按金属成形时的温度可分为：热精密成形、冷精密成形和温热精密成形。



热精密成形是坯料采用少无氧化加热，然后在高温下成形，这时金属材料的塑性较好，变形抗力小。但目前防止氧化的效果还不够理想，有待进一步研究开发。

冷精密成形是在室温下进行的，由于未经加热，不存在氧化、脱碳和热胀冷缩问题，但金属材料的变形抗力较大，塑性较低。

温热精密成形是将坯料加热到未产生严重氧化和脱碳的温度下进行的。温热精密成形既可防止坯料表面剧烈氧化，又可避免冷精密成形时变形抗力较大的缺点。

表2.9-2反映了热、温、冷三种精密模锻工艺所能达到的技术指标和适用范围。

表2.9-2 热锻温锻冷锻工艺达到的技术指标及实用范围比较

模锻	尺寸精度（精度等级）	表面粗糙度/μm	锻件质量/kg	可利用的钢	毛坯的处理	经济批量/件	模具寿命/件
热锻	12~16	>100	0.005~1 500	任意	不要求	>500	$2\times10^3\sim5\times10^3$
温锻	9~12	<30	0.1~50	碳素钢合金钢	不要求	$>10^4$	$10^4\sim2\times10^4$
冷锻	7~11	~10	0.001~30	碳素钢低合金钢	退火磷化	$>3\times10^3$	$2\times10^4\sim6\times10^4$

2 影响精密模锻件尺寸精度的主要因素

锻件的精度是一个综合性的技术问题，它与坯料的重量偏差、模具和锻件的弹性变形、模具和坯料（锻件）的热胀冷缩、模具的设计和加工精度、设备精度等有关，正确分析这些因素的影响并相应地采取有效的解决措施是保证锻件精度的重要环节。

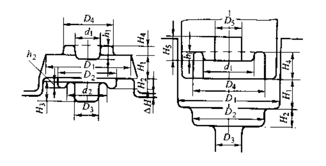
2.1 坯料体积的波动

在开式精密模锻中，因为锻模有容纳多余金属的飞边槽，正常情况下，多余的金属全部挤出到飞边槽中，坯料体积的变化并不影响锻件的尺寸。

在闭式精密模锻中，坯料体积的变化直接引起锻件尺寸的变化，当不产生毛刺或毛刺体积不变时，坯料体积增大将使锻件尺寸偏差增大。

坯料体积的偏差是由两方面因素引起的：一是下料不准确；二是坯料加热时，各个坯料烧损的重量不一样。目前精密下料可使重量偏差控制在1%之内，而一般下料方法，重量偏差常常在3%或5%以上。

对于图2.9-1所示的轴对称锻件，假设模膛水平尺寸不变，那末，毛坯体积的波动仅引起锻件高度尺寸 H_1 变化。由体积不变条件有：



(a) 锤上模锻　(b) 机械压力机上模锻

图2.9-1 闭式模锻轴对称锻件的模膛

$$\Delta H_1=\frac{\Delta V}{V}H_1 \qquad (2.9\text{-}1)$$

式中，V、ΔV 为分别为毛坯体积及其允许的偏差。若不形成飞边，即等于锻件体积及其允许的偏差。

当模膛水平尺寸也有变化，即锻件水平尺寸有偏差时，毛坯体积与锻件尺寸偏差有如下关系：

对于矩形截面的锻件

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{\Delta H_1}{H_1}+\frac{\Delta A_1}{A_1}+\frac{\Delta B_1}{B_1} \qquad (2.9\text{-}2)$$

对于圆柱形锻件

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{\Delta H_1}{H_1}+2\frac{\Delta D_1}{D_1} \qquad (2.9\text{-}3)$$

2.2 模膛的尺寸精度和磨损

模膛的尺寸精度和在模锻过程中的磨损对锻件尺寸精度有直接影响，在同一模膛的不同位置，由于变形金属的流动情况和所受到的压力不同，其磨损程度也不相同。

对于开式精密模锻，在大量生产中可采用如下模具磨损公差：模具的外长度、外宽度和外径尺寸的磨损公差是用外长度、外宽度和外径尺寸乘以表2.9-3中相应的材料系数而得。这个公差加在锻件外长度、外宽度和外径尺寸的正偏差上。

表2.9-3 计算模具磨损公差的材料系数

锻件材料	系数
碳钢	0.004
低合金钢	0.005
高铬马氏体和低碳高铬铁素体不锈耐热钢（如1Cr13、2Cr13）	0.006
镍铬奥氏体不锈钢（如1Cr18Ni9Ti）	0.007
耐热合金	0.008
钛合金	0.009
难熔合金	0.012
锻铝合金	0.004
超硬铝合金	0.007
镁合金	0.006
黄铜	0.002
铜	0.002

模具的内长度、内宽度和内径尺寸的磨损公差按同样方法计算，但这个公差加在内长度、内宽度和孔径尺寸的负偏差上。

模具内、外尺寸上单面公差均为计算总值的一半。模具磨损公差不能应用于中心线到中心线间的距离尺寸。

如果采用少无氧化加热，毛坯通常是没有或只有少量氧化皮。在这种条件下，模具的磨损量比模锻有氧化皮的毛坯时可减少约16%。当然采用性能更好的模具材料以及对模具进行渗氮等表面处理，可以较显著地提高模具的耐磨性能。同时，模锻时对模具进行良好的润滑和冷却，也可减少模具的磨损。由此，应根据上述多种情况的综合来确定模具的磨损公差。这些计算和考虑均可应用于闭式模锻时模具磨损公差的设计。



在机械压力机上进行闭式精密模锻时，模膛磨损对锻件尺寸的影响可用图 2.9-2 说明。模壁的磨损将引起锻件水平尺寸 A_1 的增大。若毛坯体积不变，且不产生飞边，或所产生的飞边体积不变，此时为了获得充满良好的锻件，应该减小锻件高度尺寸 H_1，即调整滑块以改变模具的封闭高度来实现。在这种情况下，锻件高度尺寸的公差 ΔH_1 就不能由模具垂直方向的磨损来决定，而应该是锻件水平尺寸磨损公差的函数。在新模具中，锻件水平方向尺寸取最小值，而高度方向尺寸取最大值；当模具磨损达最大值时，锻件水平尺寸达最大值，而高度方向尺寸达最小值。按照体积不变条件，锻件高度尺寸公差由水平尺寸的公差决定，其关系为：

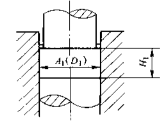


图 2.9-2　闭式模锻件的尺寸

矩形截面锻件

$$-\Delta H_1 = \Delta A_1 \frac{H_1}{A_1} + \Delta B_1 \frac{H_1}{B_1} \qquad (2.9\text{-}4)$$

圆柱形锻件

$$-\Delta H_1 = 2\Delta D_1 \frac{H_1}{D_1} \qquad (2.9\text{-}5)$$

式中，A_1、B_1 为锻件长边和短边尺寸；ΔA_1、ΔB_1 为锻件长边和短边尺寸的偏差；H_1、ΔH_1 为锻件高度尺寸及其偏差；D_1、ΔD_1 为锻件直径及其偏差。

图 2.9-3 所示为在冷镦机上闭式模锻 3 万个六角螺母后模膛的磨损深度。由磨损特征可以看出，模膛入口至中部模壁的磨损程度最大，而从中部至模底的磨损程度由最小减小至 0。磨损深度分布曲线的形状与模膛侧向压力分布曲线的形状极为相似，由此可得出模壁磨损深度同其所承受的压力间的关系。

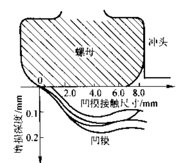


图 2.9-3　在冷镦机上闭式模锻 3 万个六角螺母后的磨损深度

2.3　模具温度和锻件温度的波动

热模锻时即使采取良好的冷却措施，模具温度一般也在 300℃以上。室温下的冷态体积成形，由于金属变形发热导致模具升温，尤其在挤压成形时模具温度也常常升至 100℃以上甚至到 200℃。总之在模锻过程中模具的温度是波动的。而模具温度的波动会引起模膛容积的变化，其变化值可按下式计算：

$$\frac{\Delta V_1}{V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \qquad (2.9\text{-}6)$$

$$\Delta V_1 = V_t - V_0;$$

式中，ΔV_1 为模膛容积的变化值；V_0 为预定温度下的模膛容积；V_t 为锻造时实测温度下的模膛容积；$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ 为三个互相垂直方向上模膛尺寸相对变化量。

如果模具温度分布均匀，当模具实测温度与预定温度相差 Δt 时，则

$$\frac{\Delta V_1}{V_0} = 3\varepsilon = 3\alpha\Delta t \qquad (2.9\text{-}7)$$

式中，α 为模具材料的线膨胀系数。

对于淬硬钢，可取 $\alpha \approx 0.000\,012$，则有

$$\frac{\Delta V_1}{V_0} = 0.000\,036\Delta t \qquad (2.9\text{-}8)$$

由模具温度和锻件温度波动引起的锻件尺寸变化，可按下式计算：

$$\Delta A = A_1\alpha_1\Delta t_1 + A_2\alpha_2\Delta t_2 \qquad (2.9\text{-}9)$$

式中，ΔA 为 A 方向锻件尺寸对公称尺寸的波动值；A_1 为在预定温度下 A 方向的锻件尺寸；Δt_1 为模锻结束时锻件温度对预定温度的波动值；A_2 为在预定温度下 A 方向的模膛尺寸；Δt_2 为模锻结束时模具温度对预定温度的波动值；α_1、α_2 为锻件材料和模具材料的线膨胀系数。

计算 ΔA 时，应该注意，提高终锻时的锻件温度将使锻件尺寸减小，而提高模具温度则使锻件尺寸增大。

此外，模具的弹性变形对锻件尺寸精度也有直接影响，润滑剂不均匀和润滑剂残渣会使锻件个别尺寸减小，锻件冷却时也可能变形，必须根据具体情况进行计算。

曾经有过一种看法，即对于直径尺寸为 4 级精度的棒料，只有完全按毛坯长度的公称尺寸下料，确保毛坯体积波动值不大于 1%，才能作为闭式精密模锻的毛坯。实验表明，在大批量生产中用剪切机械或通用机械压力机上用模具下料，长度的最小波动量为 ±0.5 mm，这是不能满足体积波动值不大于 1%的要求的，即使在锯床上也达不到这么高的精度。然而，在热模锻中，如果各种波动因素都处于极限状态，而初始毛坯有精确的体积，这时，模膛和变形金属间的体积波动达 5.4%。这表明，在闭式模锻中，单纯追求精确的毛坯体积并不能达到预想的效果，必须从下料、加热、模具的耐磨性等多方面采取措施，才能获得良好的效果。尤其在模膛中适当的部位设置余料分流腔，即采用半闭式模锻，可大大降低对上述各种因素的严格限制。

2.4　零件结构的工艺性

对于闭式精密模锻件而言，由于毛坯在封闭模膛中经塑性变形而获得，故零件的结构即几何形状也是影响锻件尺寸精度的因素之一。这就要求设计者在可能的范围内应考虑其模锻变形特点，设计出适合于闭式精密模锻工艺的锻件形状。而在制订闭式精密模锻工艺方案时，应根据变形过程中金属的流动特点，考虑零件结构对锻件尺寸精度的影响，采取相应的技术措施。

以汽车传动轴万向节的闭式挤压模锻为例，该锻件的耳部即叉形端部若完全按零件图来锻造，即使内侧面平行地预留 0.5～1 mm 的余量，待锻件冷却后，叉形口部的尺寸也会小于根部尺寸，而将根部至耳朵顶端内侧相连接成自然的斜度后，所得锻件就不会出现叉形口部尺寸比根部尺寸小的现像，而将口部尺寸由零件的 60 mm 减小至锻件的 57 mm，并自上而下地形成斜度，所得锻件的工艺性能更稳定。

例如具有薄壁高筋的锻件，模锻时常常不易充满；又如呈扭曲形状的汽轮机叶片，模锻后锻件上各处的弹复量和冷收缩量均不一样；再如某些轴线弯曲的轴类锻件，模锻时由于分模面不在同一平面内，有时产生的错移力比较大，即使采取平衡错移力的措施，也不能完全消除，使尺寸偏差增大。

2.5 模具和锻件的弹性变形

精密成形时，由于应力作用，模具和坯料均产生弹性变形，这对锻件的尺寸精度有较大的影响。以模锻为例，模膛因受内压力作用，尺寸增大；而坯料则受压产生压缩弹性变形。外力去除后，两者都向相反方向弹复，结果使锻件尺寸增大。其数值是模具和锻件的弹性变形量的总和。模具和锻件的弹性变形量，可根据材料的弹性模数、应力的数值和相应部分的尺寸来确定。但是，从弹性理论上求出弹复值是十分困难的，实际的弹复值通常是通过各种工艺试验来确定的。

2.6 锻件高度尺寸的变化同各种影响因素的关系

如果已知毛坯尺寸的偏差，那么毛坯体积的最大变化率为：

$$\lambda = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{min}} = \frac{2}{d_{bmin}}\left(\frac{\Delta L}{m} + \Delta_1 + \Delta_2\right) \qquad (2.9\text{-}10)$$

式中，d_{bmin}为毛坯最小直径；ΔL为毛坯长度偏差；m为毛坯的高度与直径之比；Δ_1、Δ_2为毛坯直径的正、负偏差绝对值。

按轧材下料的圆柱形毛坯考虑，应有：

$$\Delta H = \frac{2d_b^2}{D^2}\left[\Delta L + m\ (\Delta_1 + \Delta_2)\right] \qquad (2.9\text{-}11)$$

锻件高度尺寸的变化值ΔH与模膛磨损、温度波动等各影响因素间的关系为：

$$\Delta H = \frac{4\Delta V}{\pi D^2} \qquad (2.9\text{-}12)$$

式中，ΔV为毛坯体积的绝对变化值；D为锻件或模膛最大直径。

3 各类锻件的精密模锻工艺方案分析

精锻件与普通模锻件相比有如下特点：

1）精锻件形状比一般模锻件复杂，一般模锻件可以通过增加余块来简化形状，而精锻件接近于零件的形状。

2）精锻件的高度（厚度）、壁厚或肋宽等尺寸比一般模锻件的小，因为一般模锻件有加工余量，而精锻件一般不留加工余量或少留加工余量。

3）精锻件的尺寸精度比一般模锻件高而粗糙度比一般模锻件低。由于精锻件形状复杂（对同一零件而言），与一般模锻件相比可能需要增加一些成形工序，或需要采用新的成形方法。由于精锻件的高度（厚度）、肋宽和壁厚比一般模锻件小（对同一零件而言），因此无论是镦粗成形，压入成形或挤压成形都将使变形抗力增大，尤其是室温或中温成形时，都可能使模具的强度满足不了要求，这就要求采用一些可以降低变形抗力的工艺措施。例如：采用局部塑性变形工序或采用等温成形新工艺等。由于精锻件的尺寸精度要求高和粗糙度要求低，常常在初步精成形后，还要再增加一道精整工序。

因此，在确定精锻件的成形方案时，应当根据零件的生产批量等，综合考虑锻件的形状和尺寸、精度要求，以及模具、设备等因素，使得锻件的成形质量好，工艺过程尽量简便，生产效率和经济效益高等。现结合一些常见的精锻件具体分析讨论如下。

3.1 齿轮类锻件

对于齿形在端面，齿高较矮的零件，可以利用带齿槽的冲头，在室温和中温（视材料变形抗力而定）直接压出齿形，可以获得尺寸精确（和冲头齿槽的尺寸几乎完全一致），表面粗糙度小（冷压齿面可达 Ra1.6 μm 以下）的齿形零件。这样的齿轮类锻件最好在精压机上进行精锻，也可在摩擦压力机和普通冲床上进行。

对于齿形在端面且齿较高的斜锥齿轮（如图 2.9-4 所示），这类锻件一般为钢件，变形抗力较大，应采用高温（1 100 ~ 1 000℃）成形。由于齿较高，仅一次模压很难获得尺寸精确的锻件，因此，应当先初步精锻，经切边和清理后再进行温热（750 ~ 850℃）精压。温热精压是保证该类锻件尺寸精度和表面粗糙度的关键。

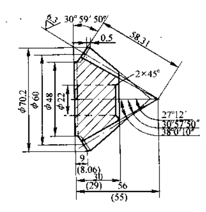
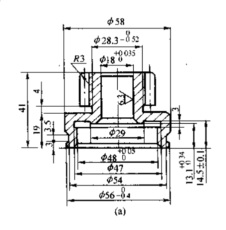


图 2.9-4 直齿圆锥齿轮锻件图

对于一端带齿的小尺寸电机齿轮，（如图 2.9-5 所示），采用挤压模锻工艺较为合适，不带齿形的部分可作为挤压时的余料。



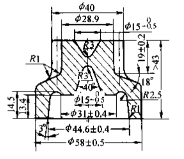


图 2.9-5 电机齿轮的零件图和精密锻件图

3.2 带有薄肋的锻件

压气机叶轮，带有叶片的压气机涡轮盘等（图 2.9-6 所示），都是带有薄肋的锻件，其模压成形通常是困难的。因为金属充填窄而深的型槽时变形阻力很大，其原因是：由摩擦力引起的在充填方向的应力 σ_1（阻力）很大，由于肋薄，金属在充填过程中温降大、σ_s 增大。因此，对这类锻件精密成形时常采用下述两种工艺。

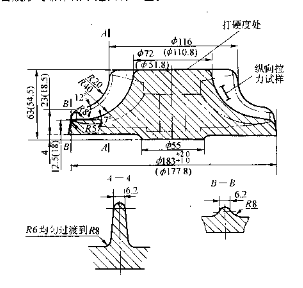


图 2.9-6 叶轮精密锻件图

1）高速成形。对于黑色金属，高速锤模锻成形可以减少摩擦阻力；可以减少与模具的接触时间；减少温降；可以利用金属高速流动的惯性。

2）等温模锻或等温超塑模锻成形。钛合金的涡轮盘采用等温超塑性模锻成形工艺，可大幅度降低变形抗力、大大提高金属的充填性能。

3.3 带工字形断面复杂长轴类锻件

带工字形断面的复杂长轴类锻件，如汽车前梁、连杆等，目前国内外普遍采用辊锻制坯，然后在热模锻压力机上模锻成形，工艺先进，锻件质量好，但飞边金属损耗较大，材料利用率较低。对于这类锻件，近年来出现了一些新的精密模锻工艺方法，取得了好的效果。

1）前梁成形辊锻整体模锻工艺。加热至始锻温度的坯料，通过制坯辊锻、预成形辊锻和终成形辊锻后得到一直长锻件（图 2.9-8）。该锻件中段非对称工字形断面已达到前梁最终锻件（图 2.9-7）相应部分的形状和尺寸要求，两头已达到了预成的目的。然后在 25 000 kN 或 31 500 kN 螺旋压力机完成弯曲成形和整体模锻成形。整体模锻时主要是前梁的两端最终成形而中段仅防止已成形的工字形断面变形和进一步精整。因面也称为前梁辊锻模锻复合精锻工艺。

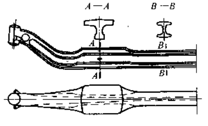


图 2.9-7 汽车前梁锻件图

这种复合成形工艺将成形辊锻与整体模锻工艺两者的优点进行了有机结合。其综合优点是，锻件质量好，工艺流程短，材料利用率高，能耗低、生产效率高，彻底解决了单纯成形辊锻工艺生产时前梁锻件长度尺寸难以控制的难题，更适合于多品种大批量生产。

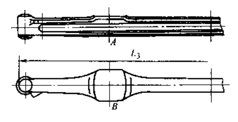


图 2.9-8 汽车前梁成形辊锻件图

2）轿车连杆精密模锻。轿车连杆锻件其重量一般均在 0.5 kg以下，重量偏差在 3～5 g 范围内，为了适应这一严格要求，不少厂家采用如下工艺方法：首先采用开式模锻获得普通模锻件，然后再将已切离飞边的锻件加热 700～800℃进行闭式精密模锻，修边后所得最终锻件，其高度尺寸及重量偏差完全达到所规定的严格要求。

3.4 形状复杂的锻件

有些精密模锻件，形状很复杂（如图 2.9-9 所示），采用一个分模面时，模压后锻件不易取出，否则就必须加余块和敷料。对这些锻件应当增加分模面，即采用多向模锻工艺。丝锥也是采用多向成形工艺，把感应加热好的毛坯经四个冲头一次同时加压，即可获得尺寸精确的锻件。

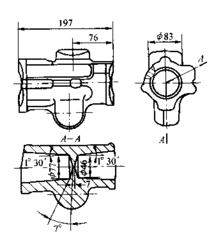


图 2.9-9 缸体锻件图

4 精密模锻模具设计特点

同普通模锻相比，主要体现在模膛设计、模膛尺寸计算、模膛制造精度、导向装置和推出机构等方面，以确保提高锻件的尺寸精度和表面质量。

4.1 精密模锻模膛与精密模锻件的设计

与普通模锻一样，精密模锻模膛的形状各公称尺寸完全按精密模锻件图来设计与制造，因此，下面着重介绍精密模锻件图的设计特点。

1）精密模锻件的机械加工余量。对精密模锻件的尺寸精度或表面质量达不到产品零件图要求之处，需要进行机械加工，此时可根据 GB/T 12362—1990 或加工方法预留加工余量，可参见表 2.9-4。

表 2.9-4 钢质锻件机械加工余量（单边余量） mm

机械加工工序名称		锻件尺寸						
		碳素钢				不锈钢		
		1～5	5～10	10～20	20以上	1～10	10～20	20以上
车铣刨		0.6	0.8	1.0	1.2	0.5	0.8	1.0
锉削或用砂轮粗磨	重要部分	0.3	0.3	0.5	0.75	0.2	0.3	0.5
	不重要部分	0.15～0.25				0.15～0.25		
磨 削		0.10～0.20				0.1～0.15		
抛 光		0.1				0.1		
滚 光		0.10～0.20				0.1～0.20		

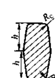
注：有色金属及合金锻件，其加工余量 钢锻件小 25%。

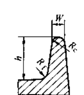
2）分模面。选择恰当的分模面，以保证锻件流线方向与主要工作应力方向一致。对应力腐蚀较为敏感的材料，应避免在分模线上形成飞边，因为它能导致流线横向分布和流线末端外露，从而降低零件的实际承载能力，所以最好采用无飞边的闭式模锻或挤压工艺。

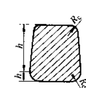
3）模锻斜度。精密模锻时，建议采用的模锻斜度值是，铝合金锻件为 1°～3°，钢锻件为 3°～5°，模锻斜度公差为 ±0.5°或 ±1°。

4）圆角半径。精密成形时的圆角半径可参照表 2.9-5。

表 2.9-5 一些实际生产的精密模锻件的圆角半径值 mm







肋					内圆角半径 R_i	比值 R_i/R_o	腹板厚度
肋高 h	外圆角半径 R_o	肋宽 W	高宽比 h/W	模锻斜度 l (°)			
铝合金锻件（圆顶肋）							
14.2	1.8	3.6	4:1	5	3.0	1.7:1	3.0
21.3	2.0	3.0	7:1	0	6.4	2:1	3.1
21.3	2	4.1	5.25:1	0	3.0	1.5:1	4.1
23.6	1.5	3.3	7:1	0	2.2	1.5:1	5.1
28.4	1.3	2.5	11:1	0、1	6.4	5:1	2
29.2	2.3	4.8	6:1	3	3.3	1.4:1	4.8
31	2.3	2.5	12:1	0	3.3	1.4:1	无腹板
32.5	1.5	3.0	10:1	1	6.4	4:1	3.0
34.2	3.3	6.4	5.5:1	0、1.5	12.7	3.8:1	6.4
38.1	3.0	6.4	6:1	0	12.7	4.2:1	5.3
54	2.4	3.2	17:1	0	3.2	1.4:1	2.4
74.1	1.5	3.2	23:1	3	6.4	4:1	2
铝合金锻件（平顶肋）							
22.8	1.5	12.7	1.8:1	0	5.4	4.2:1	2.5
23.4	1.5	3.8	5:1	0	5.4	4.2:1	2
钢 锻 件							
76.2	6.4	25.4	3:1	4①	12.7	2:1	12.7

① 指最大模锻斜度。

4.2 模膛尺寸计算

在普通模锻中，终锻模膛尺寸系按照热锻件图确定。由于仅考虑了锻件的冷却收缩，而不考虑其他因素，所以锻件的公差较大。对于精度要求较高的精密模锻件，应综合考虑各种因素的影响，合理地确定模膛尺寸。

在简化设计中，精密模锻的模膛尺寸可按式（2.9-13）确定，然后通过试锻加以修正。如图 2.9-10 所示的锻模，模

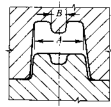


图 2.9-10 模膛尺寸简图

膛外径为:

$$A = A_n + A_n \alpha_k t - A_n \alpha_d t_d - \Delta A_s \qquad (2.9\text{-}13)$$

式中,A 为模膛外径,mm;A_n 为锻件相应外径的公称尺寸,mm;α_k 为毛坯的线膨胀系数,℃$^{-1}$;t 为终锻时锻件的温度,℃;α_d 为模具材料的线膨胀系数,℃$^{-1}$;t_d 为模具工作温度,℃;ΔA_s 为模锻时模膛外径 A 的弹性变形绝对值,mm。

冲头直径 B 按下式计算:

$$B = B_n + B_n \alpha t - B_n \alpha_d t_d + \Delta B_s \qquad (2.9\text{-}14)$$

式中,B 为冲头或模膛冲孔凸台直径,mm;B_n 为锻件孔的公称尺寸,mm;ΔB_s 为模锻时冲头直径 B 的弹性变形值,mm,当直径 B 变大时,ΔB_s 为负值,当直径 B 减小时,ΔB_s 为正值。其余符号与式(2.9-13)相同。

关于模膛的磨损等因素,可在锻件公差中考虑,而通过模膛制造公差来体现。

4.3 模膛的尺寸公差和表面粗糙度

模膛的尺寸精度和表面粗糙度,是根据锻件图对锻模所要求的精度和表面粗糙度等级来确定的。

一般来说,对于中小型锻模和形状不太复杂的模膛,系按三级和四级精度制造;对于大型锻模和形状复杂的模膛,系按四级和五级精度制造。如果锻件精度高,则相应地提高模膛制造精度。

应根据加工的可能性,考虑模具表面的粗糙度。对有利于金属流动和减小摩擦来说,希望粗糙度低些。通常,模膛中重要部位的粗糙度 Ra 应为 1.6 μm 以上,一般部位的粗糙度 Ra 为 3.2~1.6 μm。

4.4 有深凹穴且形状复杂的模膛的布置

对于水平可分凹模,有深的凹穴和形状复杂的模膛,最好布置在上模,这样不仅有利于金属更好地充满模膛,而且也便于清除氧化皮和润滑剂残渣。由于上模与热锻件接触时间较短,温度较低,因而模具寿命较长。下模膛有深的凹穴和直棱角时,氧化皮和润滑剂残渣填塞在角部处,无法吹掉,妨碍锻件棱角或肋条的充满,导致形成废品。在模膛深穴处应有通气孔,以便排出空气,保证模膛充满。通气孔直径一般为 1~1.5 mm。

4.5 模具的导向装置

精密模锻模具上常用的导柱导套结构及其与模座的紧固形式如图 2.9-11 所示。为了保持良好的润滑状态,在导柱(图 2.9-11a)或在导套(图 2.9-11b)上开有油槽,导柱直径 d 在总长上做成统一的名义尺寸,其公差按压入段和导向段配合性质而定;直径 d 的大小可根据模具的结构及导柱本身的强度,刚度等条件来确定。导柱总长一般按模具的结构尺寸而定,但必须保证凸模伸入凹模之前,导柱应伸入导套 10 mm 以上。通常,导柱与导套按二级精度$\frac{H7}{f7}$配合;要求较低的模具,可采用三级精度的滑动配合。

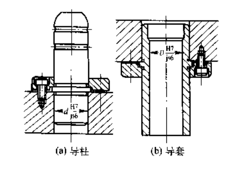


图 2.9-11 导柱导套的结构及其固定方式

通常采用基孔制过渡配合,用环形压板螺钉将导柱导套紧固在上、下模座上。

4.6 模具的推出装置

精密模锻,尤其是闭式精密模锻,为了能迅速地从模膛中推出锻件和使模具可靠地工作,在模具设计和制造中,对推出装置应给予足够的重视。在机械压力机、螺旋压力机和液压机等设备上精密模锻时,可利用设备上的推出装置迅速将锻件从模膛中推出。

图 2.9-12 所示为机械压力机上闭式精密模锻用的有推出装置的锻模。由压力机中的液压推出器或机械推出器的推杆 8,通过调整垫板 6 推动锻模推杆 4 而推出锻件。

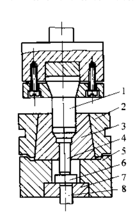


图 2.9-12 机械压力机用带推出装置的精锻模
1—冲头;2—预应力圈;3—凹模;4、8—推杆
5—下模板;6—调整垫板;7—垫板

5 实例

直齿圆锥齿轮的精密模锻是一个既典型在生产中又广泛应用的例子。很多文献指出,精锻齿轮因金属流线沿齿廓分布且组织致密,使得齿轮的强度、齿面的耐磨能力、热处理工艺性和啮合噪声都比切削加工的齿轮优越。与切削加工比较,精锻齿轮的强度可提高 20%,抗弯疲劳寿命提高 20%,热处理变形减少 30%,生产成本降低 20%以上。并且认为,生产批量在 300~500 件以上,经济上就是合理的。

1) 工艺过程。以行星齿轮(图 2.9-13)为例,其精锻齿轮的工艺流程为:下料→车削或磨削外圆、除去表面缺陷层→加热→精密模锻→冷切边→酸洗(或喷砂)→加热→精压→冷切边(或喷砂)→镗孔、车背锥球面→球处理→喷丸→磨内孔和背锥球面。

2) 锻件图制订。图 2.9-13 和图 2.9-14 分别为行星齿轮零件图和精锻件图。制订锻件图时主要考虑如下几方面。

① 分模面位置。将分模面选择在锻件最大直径处，能锻出全部齿形，并能顺利脱模。

② 加工余量。齿形和小端面不需机械加工，不留余量。背锥面是安装基准面，精锻时不能达到精度要求，预留1 mm加工余量。

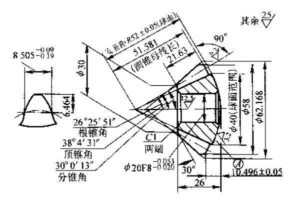


图 2.9-13 行星齿轮零件图

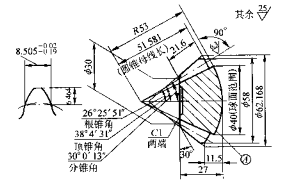


图 2.9-14 行星齿轮精密锻件图

③ 冲孔连皮。当锻件上的孔径大于25 mm时，应锻出有斜度和连皮的锻件。对于圆锥齿轮精密模锻的研究指出，当锻出中间孔时，连皮的位置对齿形充满情况有影响，连皮至端面距离约为0.6H时，齿形充满情况最好，其中H为不包括轮毂部分的锻件高度，如图2.9-15所示。连皮厚度$h=(0.2\sim0.3)\ d$，但不宜小于6～8 mm。行星齿轮孔径$d=20$ mm，不锻出。

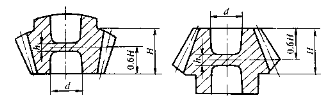


图 2.9-15 冲孔连皮位置

3) 精锻模具。图2.9-16为行星齿轮精锻模具，它是开式精密模锻的典型结构。一般来说，齿形模膛设置在上模有利于成形和提高模具寿命。但对行星齿轮的精锻模来说，为了安放毛坯方便和便于推出锻件，凹模9安放在下模板13上，这对于清除齿形模膛中的氧化皮或润滑剂残渣、提高模具寿命是不利的。采用双层组合凹模，凹模9用预应力圈6加强。凹模压圈7仅起固紧凹模的作用。模锻后，由推杆10把锻件从凹模中推出。

图2.9-17为半闭式精密模锻圆锥齿轮的典型结构。该模具上的关键零件是环形齿圈，模锻时由它直接压出轮齿齿形。利用这种结构的半闭式精密模锻，在16 000 kN、25 000 kN和40 000 kN热模锻压力机上可以模锻公称直径为79～229 mm，具有直线型和曲线型的圆锥齿轮。其工艺流程为：剪床下料→电感应加热→模锻（镦粗和终锻）。为提高终锻模镶块寿命，模锻在两个镶块中轮流进行。终锻模镶块寿命为2 500～3 000件，生产率为2 500件/班。

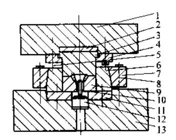


图 2.9-16 行星齿轮精锻模

1—上模板；2—上模垫板；3—上模；4—压板；5、8—螺栓；6—预应力圈；7—凹模压圈；9—凹模；10—推杆；11—凹模垫板；12—垫板；13—下模板

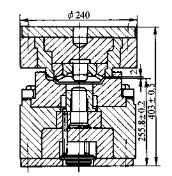


图 2.9-17 圆锥齿轮半闭式精密锻模

6 冷精密模锻的特点与应用

6.1 传统冷精密模锻工艺的特点与应用

冷精密模锻生产最早是从冷挤压开始的，到目前为止，冷挤压成形也是冷精密模锻生产的主要形式，所以有一种习惯以冷挤压（cold extrusion）来概括整个冷锻生产技术。其实，这么说并不确切，因冷精密模锻发展到今天还包括冷镦和其他体积成形形式，所以冷精密模锻（cold precision forging）这个词才能更准确和全面地描述冷锻生产技术。冷精密模锻的最大特点是：优质、高效、低能耗、大批量，冷锻生产能力的大小和工艺水平的高低已成为衡量一个国家工业化水平的一个方面。

冷挤压的优点是，节约原材料，提高零件的机械性能，提高尺寸精度及降低表面粗糙度，减少后续加工工序，提高了生产率。其缺点是，冷挤压的变形抗力大，需要设备吨位大，冷挤压前需对毛坯进行退火和表面处理，对于需要多道冷挤压工序生产的零件，不能实现连续生产。冷挤适合于低碳钢、低合金钢和铜、铝等有色金属及其合金的杯筒类，阶梯轴类。球头销类零件，实心与空心型材的生产。

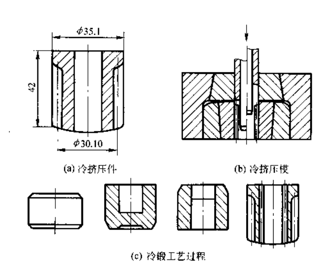
冷镦是指常温下金属线材在自动冷镦机上进行镦挤成形的一种加工方法。冷镦的特点是材料利用率高，生产效率高，适合于大批量生产。冷镦多用于铆钉、螺钉、螺栓、小轴和空心套等零件的生产。

6.2 冷精密模锻工艺的新进展

随着冷锻工艺技术和精密模具制造技术的发展，汽车齿轮和齿形类零件的生产已越来越多地采用冷锻成形。当前国外一台普通轿车采用的冷锻件总质量 40～45 kg，其中齿形类零件总质量达10 kg以上。冷锻成形的齿轮单件质量可达 1 kg以上、齿形精度可达（DIN）7级。随着汽车的轻量化和人们对环境保护越来越严格的要求，汽车齿轮制造业将更多地应用冷锻成形技术。

（1）圆柱齿轮的冷挤压成形的优缺点分析

圆柱齿轮的正挤压成形是应用最早的齿形成形工艺。典型零件是汽车起动电动机起动齿轮（图 2.9-18a）和汽车传动轴花键。起动齿轮的模具结构和工艺过程见（图 2.9-18b、图 2.9-18c）。由于冷挤压过程是金属在高应力下的塑性变形，因此，冷挤压成形的起动齿轮组织致密，金属纤维连续，疲劳强度和耐磨性比切削加工的齿轮要高出许多。特别是冷挤成形的起动齿轮结构上一端封闭，为轮齿提供了额外的抗弯强度，最适合于汽车起动机频繁冲击和高载荷工况下工作。齿轮正挤压成形时，齿形凹模可以用高精度线切割机床加工。当齿形挤压模具采用高速钢材料时，模具齿形制造精度达到（DIN）6级，在批量生产条件下，齿轮成形精度稳定达到（DIN）8～9级。考虑到模具的弹性变形和磨损，在大批量生产时改用硬质合金模具并合理设计冷锻变形率，可使正挤压齿轮的齿形精度进一步达到（DIN）7～7.5级。成形模的齿形设计要考虑冷锻过程中模具的弹性变形和模具磨损的影响，对模具齿形加以必要的修正。由于在挤压过程中模具曲率大的部分磨损速率大于曲率小的部分，因此，采用标准齿形的齿轮挤压模齿顶处的磨损明显大于齿面和齿根处的磨损。如果对齿形作适当修正（图 2.9-19），可使模具齿形获得均匀磨损的效果，从而得到较长的模具寿命。正挤压成形工艺的另一特出优点是模具齿形由数控线切割加工得到，在少齿数齿轮加工时通过编程即可获得理想齿形而不必担心根切。在加工特殊齿形或修正齿形场合，采用数控线切割加工齿形比齿轮的展成加工或仿形加工更方便、更快捷、更正确。



(a) 冷挤压件　　(b) 冷挤压模

(c) 冷锻工艺过程

图 2.9-18　汽车起动齿轮冷挤压

齿轮正挤压成形的缺点是成形齿坯的头、尾有较大的塌角和过渡圆弧，因此齿轮两端面切削余量大，材料利用率不高，也影响了生产效率的进一步提高。另外齿轮端面切削后容易残留毛刺，而去毛刺是机加工中最伤脑筋的问题。另外，受挤压变形率的限制，并考虑到模具制造尺寸和冷锻压力机能力等因素，齿轮正挤压成形目前只应用于小规格小模数齿轮的制造。当然，比起切齿加工，齿轮挤压成形无论是在质量、效率和效益方面，都是一个飞跃。

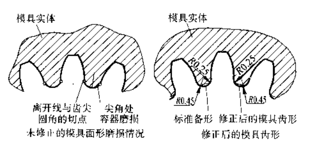


图 2.9-19　齿轮挤压模的齿形修正

对于内齿轮的制造，可用齿形冲头反挤压成形。用该工艺可制造贯通的内齿轮（图 2.9-20），也可制造底部不通的内齿轮（图 2.9-21）。在后一种场合，齿轮冷锻成形不需要预加工退刀槽，因而在有限尺寸内可保证制出最大限度的有效齿形，从而可优化零部件结构，减小齿轮传动系统的尺寸并提高齿轮强度。

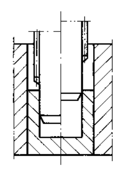


图 2.9-20　贯通内齿轮的反挤压成形

当代，齿轮的挤压成形技术已从正齿轮成形发展到了斜齿圆柱齿轮和螺旋花键轴的挤压成形，齿形精度已达到（DIN）7级，能充分满足大部分汽车齿形零件的要求。冷挤压成形的齿形零件应用已从汽车起动电动机、汽车摇窗机等外围部件发展到汽车转向机、汽车变速箱等关键总成上。

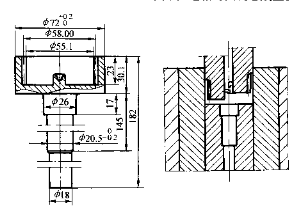


图 2.9-21　内齿轮的反挤压成形

（2）锥齿轮闭式冷锻成形

锥齿轮的精密锻造最早见于20世纪50年代德国的拜尔工厂，并在蒂森、B.L.W 等公司得到广泛的应用。我国上海汽车齿轮厂等20世纪70年代就成功进行齿轮精密锻造生产。但当时采用的是热精锻技术，齿轮锻造精度 8～9级，主要应用于卡车和拖拉机工业。

20世纪70年代冷锻和闭式锻造技术得到突破和发展后，



锥齿轮的锻造精度得到较大提高，已能满足当代轿车工业的要求。目前，汽车工业发达国家的轿车、轻型车和微型车的行星齿轮、半轴齿轮（差速器齿轮总成）等直齿锥齿轮已广泛采用冷锻和闭塞冷锻工艺生产，螺旋锥齿轮的精密锻造也在开发中。精锻齿轮产品已得到多个汽车厂的确认并投入了批量生产。锥齿轮闭式冷锻成形原理见图 2.9-22。

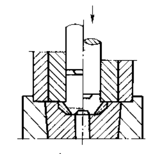


图 2.9-22 锥齿轮的闭式冷锻成形

通常，锥齿轮的切削成形往往采用刨齿机等作展成加工，而锥齿轮精锻成形模的成形电极可用数控加工和展成加工二种方法制造。二种不同方法加工出的齿轮相互啮合时有可能会有接触面不好的负面影响，因而，精锻锥齿轮推荐成对使用。

闭式冷锻成形的齿形精度可满足一般汽车的使用要求。对精度有较高要求时，在齿轮闭式成形后进行等温退火，再在精密成形模具作一次冷精整，可稳定地获得 DIN7 级的齿形成形精度。由于冷精整变形量小，并为了提高齿面质量，齿坯精整前用少量稀油喷雾润滑，无需做磷化、皂化处理。由于齿坯进行了等温退火，后续渗碳淬火时齿形变形量较小而且规律性好，因此可根据淬火变形规律对锻造齿形进行修正，最终使热处理后精度不下降。

(3) 采用分流措施的齿轮闭式精密模锻

1) 直齿圆柱齿轮分流锻造原理。图 2.9-23 为采用分流措施闭式精密模锻直齿圆柱齿轮的原理及工艺过程。第一步为以不超过模具强度的低工作压力与常规闭式模锻相结合，使齿形基本成形；第二步通过冲孔或镦锻使齿形型腔完全充满。

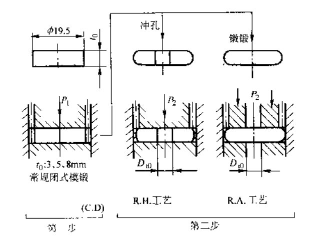


图 2.9-23 二步成形法（R.H. 工艺：利用减压孔流动原理，R.A. 工艺：利用减少轴原理）

图 2.9-24 是减压孔原理与闭式模锻相结合的工作压力变化图。所试验的直齿轮模数为1 mm、齿数 22、材料为退火纯铝。试验中，凸模行程 1 mm 时，工作压力陡然增加，甚至到 650 MPa 而齿顶还未充满，所以在压力机为 400 MPa 时即停止第一次压下。在毛坯上加工出 ϕ9 mm 的减压孔后，再压第二次，大约在图上 430 MPa 的黑点位置处齿顶就完全充满。

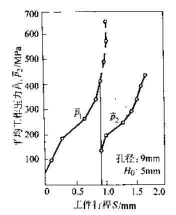


图 2.9-24 平均工作压力行程图（$\bar{p}_1$、$\bar{p}_2$—S 曲线）

模锻过程中，减压孔直径和第一步工作压力 p_1^* 的选择，影响到全部充满时的压力 p_2^* 和产品高度 H^*，其结果如图 2.9-25 所示。

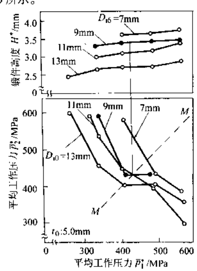


图 2.9-25 利用减压孔原理时，工作条件的影响

由图可见，完全充满时压力随 p_1^* 的增大而增加，随减压孔直径之增大而减小。如两步用同一模具，选用同样的工作压力以保持模具寿命，是值得采用的方法。这样，表示 $p_1^* = \bar{p}_2^*$ 的 $M-M$ 线和各试验曲线相交点的工作条件，即为相应于各减压孔直径的最佳条件。

图 2.9-26 表示了应用于钢件的试验情况。S10C 钢成形时相对最大工作压力小于 3，几乎和铝材料成形时的一样，这表明了这种工艺完全可投入实际应用。

2) 工艺特点。采用对比的方法即可看清其工艺特点。图 2.9-27 为其相互对比的情况。

首先与常规闭式模锻比较。采用减压孔和减压轴这两种分流原理，由于动用了分流迁移的办法而减少了变形金属同模壁间的摩擦阻力。另外，由于一部分变形金属向外流动而另一部分变形金属向齿腔内充填齿廓。同时，因分流保持了减压作用，抑制了工作压力的增加。

其次比较减压孔和减压轴的效果。为了比较其效果，用这两种方法模锻同一零件，结果表明采用减压轴分流时其 $\bar{p}_2^*$ 较高，而 H^* 则低得多。

此外，两种方法也有不同，即用减压原理时，因减压轴

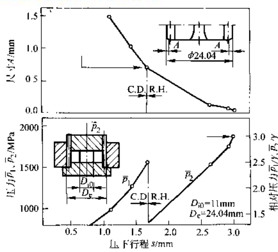


图 2.9-26 S10C 钢件上的应用

直径不变则 R 也是不变的，所以变形过程中向内流动阻力相对降低，同时分流面向外迁移，从而向外的充填流动逐渐变小，要完全充满就需要加大压下量，使工作压力进一步增大。另一方面，采用减压孔时，由于其收缩面引起自由表面的减小，向内流动阻力会逐渐增大，从而使 R 增大。又由于分流层的位置是由向向外和向内流动的平衡所决定的，向内流动的阻力逐渐增大，伴随着齿腔充填阻力的增加，从而引起了外流动。这些差别反映出这两种原理的可用性是不同的。减压孔原理更为有用。

图 2.9-28 表示了在最佳工作条件下，采用这两种方法达到完全充填的压力和以金属材料厚度为参数的材料节省。图中示出，两种方法都因厚度增加而有所改善。但采用减压孔法更好些。

3）预防齿根折叠。在某些试验条件下，当 $\bar{p}^*$ 较大或孔径偏大时，在齿根部分产生内凹缺陷，图 2.9-29 说明了产生缺陷的机理。分流层是由向外，向内流动阻力的平衡所决定，开始压下变形时，其位置小于齿根圆（图 2.9-29a），随着压下量的增加，向外流动阻力变大，分流层外移到大于齿根圆的位置。于是，齿根部材料向内流动，离开模具表面面产生内凹缺陷（图 2.9-29b）。到最终阶段时，分流层由于减压孔的收缩而移到小于齿根圆的位置，齿根部材料再次向外流动而产生折叠（图 2.9-29c）。

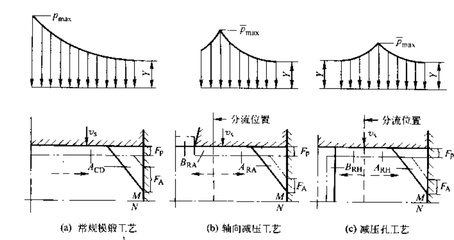


图 2.9-27 充填性和工作压力分布图

F_p—预压充填量；F_A—离心流动充填量；A_{CD}、A_{RA}、A_{RH}—离心流动时材料的迁移体积；B_{RA}、B_{RH}—向心流动时材料的迁移体积

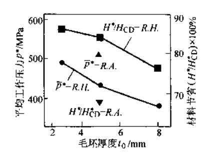


图 2.9-28 减压孔和减压轴工艺比较

此类缺陷可通过约束变形金属的向心流动来控制，也就是让芯棒比模具两面稍凸出一些，来分步控制变形金属的向心流动（图 2.9-30）。在活动模和固定模的每边，分步高 k_u 和 k_d 可以变化。这样就很容易控制折叠缺陷的产生。另外，图 2.9-30 也表明，这种措施还可以减小完全充填时的压力和增加产品高度，将 k_u 选得比 k_d 大些是有效果的。

4）生产内直齿轮时的应用。图 2.9-31 表示齿数 z 对工作压力的影响。增加齿数 z 时工作压力增加缓慢。图 2.9-32 为用减压轴和减压孔闭式模锻内直齿轮的模具结构。就相同模数和齿数所计算的工作压力进行比较表明（图 2.9-33），内齿比外齿的成形性更好。采用铅试件进行实验时（成形铅的内齿轮时工作压力比值为 2.0）也证明了这一点。因此，说明这种工艺可用于实际生产。

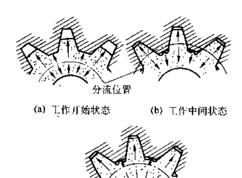


图 2.9-29 齿轮折叠缺陷的形成

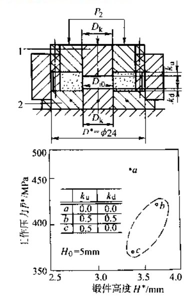


图 2.9-30 控制材料向心流动的方法（k_u、k_d 步高）
1—芯棒；2—固定手板

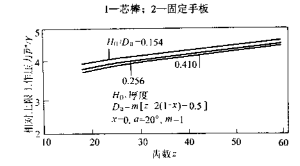


图 2.9-31 齿轮对相对上限工作压力的影响（计算结果）

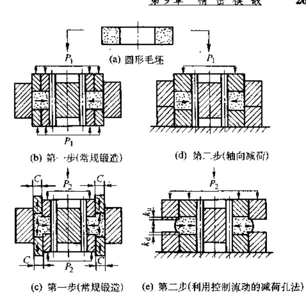


图 2.9-32 内直齿轮采用分流原理的成形工艺
k_u—较高的步高；k_d—较低的步高

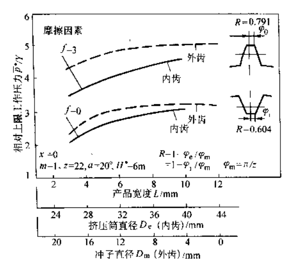


图 2.9-33 外齿轮和内齿轮成形比较

5）二步成形法的设计。假如单独实现冲孔工序，上述工艺可以在单动压力机上进行。但如果设计成双动压力机来完成冲孔和模锻，即可提高工作效率，同时也可节省金属材料。图 2.9-34 表示了两种可能的工艺设计。即先用冲子压入毛坯，然后将变薄的部分冲去，这样就要减少很多废料。

图 2.9-35 表示，由于先用了预成形的原因，用实线示出的完全充填时的工作压力比普通方式低。

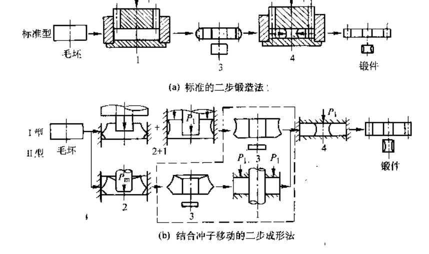


图 2.9-34 二步锻造法的设计
1—闭式模锻；2—冲子压印；3—冲孔；4—分流过程

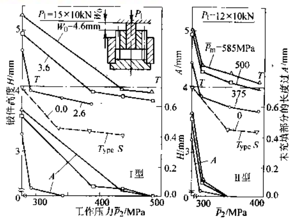


图 2.9-35 图 2.9-34 中各型完全填充的平均工作压力和锻件高度

据资料介绍，目前闭式模锻的数控多动液压机已经问世。它可以通过控制模具的运动速度，利用金属材料的自然流线来改善产品的机械性能。所以，此类压力机对这种工艺是有益的。因而在锻压领域内，将发生由数量到质量的再转变。

(4) 汽车齿轮的分流锻造

圆柱齿轮的成形工艺还有闭式冷镦锻成形等。

由于齿轮冷镦锻成形时在齿顶的尖角部金属流动条件不好，单用加大锻造力的方法不能有效地改善齿尖部的充填效果。而加大锻造力的负面效应是使模具寿命大幅度下降。锻造应力的加大还使模具弹性变形增加，最终使锻件的齿形精度下降。由于闭模锻造的特点，当齿坯的下料精度较低时，毛坯体积少量超标就会引起锻造应力的急剧上升，最终造成模具的破损失效。

20 世纪 80 年代以来，国内外精密锻造专家开始将分流锻造理论应用于圆柱齿轮和螺旋齿轮的冷锻成形。分流锻造的主要原理是在毛坯或模具的成形部分建立一个材料的分流腔成分流通道。锻造过程中，材料在充满型腔的同时，部分材料流向分流腔或分流通道。分流腔或分流通道能容纳少量体积超标的材料，而不致于造成锻造应力急剧增加的后果。更主要的是，通过对分流路径的合理设计，使锻造过程中金属的流动有利于齿形尖角处的充填，从而可在较小的成形应力下得到充满程度较好的齿形。分流锻造技术的应用，使较高精度齿轮的少、无切削加工迅速达到了产业化规模。

我国 2000 年从日本 Nichidai 公司引进齿轮分流锻造工艺技术和模具技术，开发富康轿车手动变速箱倒档齿轮零件（图 2.9-36a）。该齿轮的成形原理见图 2.9-36b，产品冷锻工艺过程见图 2.9-36c。由于倒档齿轮的齿面有一定的锥度要求，因此，齿形成形后要对齿面进行一次锥度整形。该齿轮成形和整形工序在日本小松 L1C—6300 KN 冷锻压力机上完成。

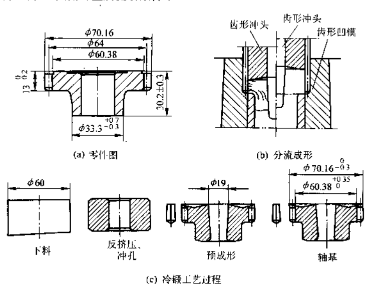


图 2.9-36 高康倒车齿轮冷精密模锻

通过倒档齿轮的分流锻造试验，我们认识到分流路径的设计是齿轮分流锻造成形的关键。对于每一个具体的齿轮，可有不同的设计方案，但基本原理是要使材料在锻造时尽量沿齿向有一定的滑动，才能在尽量小的成形应力下得到充满的齿形。

与挤压齿轮相比，分流锻造的齿轮容易获得较大的尺寸。齿轮分流锻造成形后如追加一次冷精整，同样获得较好的精度，可完全满足汽车变速箱齿轮的精度要求。另外，分流锻造的齿轮端面余量小，材料利用率高。某些情况下，齿形端面可不加工，避免了车削毛刺的发生。

分流锻造技术主要应用于汽车变速箱齿轮。除倒档齿轮和行星齿轮外，变速齿坯接合齿的成形和接合齿环等齿形零件等都有了冷锻成形的工艺和大批量生产的经验。在国外，变速箱螺旋齿轮与接合齿的整体精锻也有了成功的经验（图 2.9-37。）

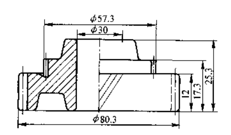


图 2.9-37 变速箱螺旋齿与接合齿整体精密模锻件

7 温精密模锻的特点与应用

温锻成形大约起始于 20 世纪 70 年代末，当初用于套筒扳手、轴承套圈等零件的生产，其后，再没有得到快速发展。但近年来又得到了迅速发展。变形温度范围为室温以上、完全再结晶温度以下。同冷锻（主要是冷挤）相比：金属的变



形抗力有明显的降低，有利于减少设备吨位和提高模具寿命；可用于难于冷锻的一些金属材料，如中高碳钢、高合金钢、镁及镁合金、钛及钛合金等；一般可以省去坯料或中间毛坯的预先退火、磷化等辅助工序，便于组织连续生产，同时大大减少了环境污染等。同热锻相比：由于加工温度低，氧化和脱碳程度大大减小，其锻件的尺寸精度、表面粗造度和机械性能与冷挤压零件接近。由于温锻工艺比较集中体现了冷锻和热锻的优点，受到人们的极大关注。尤其近年来，由于模具材质、润滑和冷却等外围技术的发展，使得模具寿命大为提高，有的工序可获得与冷锻模具相同的寿命。

目前，温锻已成功应用于轴承套圈、锥齿轮、变速箱齿轮毛坯和等速万向节等汽车零件的生产。今后的趋势是一方面将以往热锻的部分锻件温锻化，提高锻件尺寸精度，降低成本；另一方面与闭式模锻等其他技术进行结合而省去一些工序和提高成品率等。

7.1 温锻时加热温度与尺寸精度的关系

温热锻造是将坯料在650～900℃的较高温度领域中加热后进行加工的方法。

由于是在高温下加工，故必须注意：坯料表面因加热而产生氧化皮；由于热收缩而致的尺寸变化等问题。

图2.9-38，图2.9-39为对预先在坯料表面涂上石墨涂层后，防止氧化的效果的曲线图。由这些图中可知，不产生氧化皮可进行温热锻造的上限温度为900℃左右。

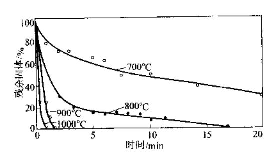


图 2.9-38 涂有石墨润滑剂的燃烧

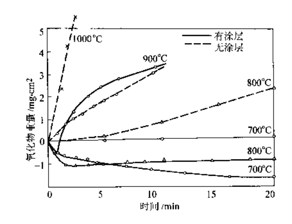


图 2.9-39 有涂层和无涂层时氧化物重量

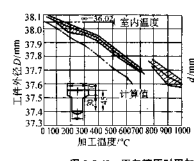
图2.9-40为正向挤压加工时，由于加工温度不同，给尺寸所带来的影响与变化的研究结果。斜线所示范围示出数据的波动情况；点划线表示热收缩量的计算值。实测值与计算值之间有少许差异，这是由于金属模具及加工制件的弹性变形，加工热量，由于与金属模具接触加工制件温度降低等影响所致。

另外，在700℃与800℃之间，尺寸变化发生间断，这是因为钢的变态所致。在这个温度范围锻造，尺寸精度的波动范围变大，故此一定要避开。

金属模具在高温下经常与被加热了的坯料相接触，故磨损和变形比冷锻要快，时间长了就难以维持高精度，解决这个问题是温热锻造的最大课题。

根据这种情况，当采用温热锻造时，对于部件的工序设计，希望只靠温热锻造来获得严格的尺寸精度和最终形状，是十分困难的。

当然，像等速联轴器（轴承）内圈即星形套那样，只靠温热锻造就得到尺寸精度高的制品的例子也有。但是，考虑到金属模具的寿命及生产率，在后道工序加上切削加工也是一种方法。此外，像等速联轴节（轴承）钟形套那样，在后道工序使之与冷精压加工组合，由此实现大幅度降低成本的部件也有。



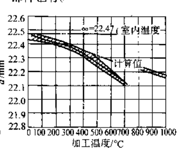


图 2.9-40 正向挤压时因加工温度所造成的尺寸变化

在此，以实际的锻造品为例，对以目前的温热锻造能进行哪种程度的尺寸精度加工，与加有后续加工工序时尺寸精度能提高至多少等问题介绍一下。

7.2 温精密模锻的应用实例

等速联轴器的（轴承）星形套以前是用多道工序以冷锻加工的，但为防止锻件局部填充不足和防止模具破损，故必须增加将被挤出的部分材料，成为切削余量非常多的锻件。

经过温热锻造的（轴承）星形套，首先是对最费事的（轴承）沟槽进行机械加工，外周球形部分不必切削加工，仅于渗碳处理后进行磨削加工。

产品的上、下端面与（轴承）沟槽或外周之间的位置偏移，由于可以取为0.1 mm以下，故切削余量变得非常之少。

（轴承）星形套的加工工序如图2.9-41所示；锻件图如图2.9-42所示。

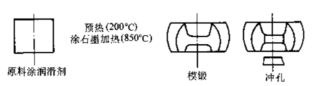


图 2.9-41 星形套的温锻加工

（轴承）星形套磨削余量为单侧0.24～0.34 mm，外周部分的磨削余量为0.23～0.33 mm，厚度方向也有单侧0.2～0.3 mm程度的切削余量。

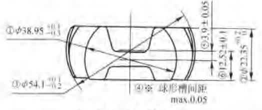


图 2.9-42　星形套锻件图

表 2.9-6 示出将 1 000 个（轴承）星形套连续成形时的数据。锻造品的热收缩量，由于金属模是通过反馈金属模的弹性变形量而制作的，故产品的尺寸精度高，磨削余量也均匀。

表中，序号 1 ~ 3 为每个样件的 9 个测量位置测定的最大值及最小值；序号 4 为每个样件的 6 个测量位置测定的最大值及最小值；序号 5 ~ 6 为每个样件的 3 个测量位置测定的最大值及最小值。

圆锥齿轮温锻冷精压复合精锻圆锥齿轮温锻制品如图 2.9-43 照片所示。

表 2.9-6　星形套形成的尺寸变化

Na	规格 \ 样件数量	1	200	400	600	800	1000
1	$\phi 38.95^{+0.1}_{-0.2}$	−0.17 ~ −0.10	−0.16 ~ −0.10	−0.16 ~ −0.12	−0.17 ~ −0.11	−0.18 ~ −0.10	−0.16 ~ −0.11
2	$22.35^{+0.2}_{0}$	0.09	0.09	0.08	0.10	0.10	0.09
3	$54.1^{+0.1}_{-0.2}$	−0.14 ~ −0.09	−0.15 ~ −0.10	−0.17 ~ −0.10	−0.17 ~ −0.08	−0.15 ~ −0.10	−0.16 ~ −0.10
4	间距偏差 max.0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
5	3.9 ±0.05	0.01 ~ 0.02	0.01 ~ 0.02	0.01 ~ 0.03	0.01 ~ 0.03	0.01	0 ~ 0.02
6	12.52 ± 0.1	−0.01	−0.01 ~ 0.00	−0.01 ~ 0.00	−0.01	−0.00 ~ 0.00	−0.01



图 2.9-43　温锻圆锥齿轮照片

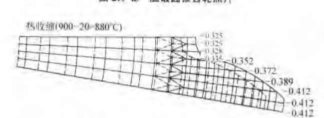


图 2.9-44　温锻圆锥齿轮齿形的热收缩

经过温热锻造后的齿形由于热收缩而发生变化，如图 2.9-44 所示。除此之外再考虑金属模的弹性变形量、锻造品的弹性变形量，可以确定金属模的尺寸。

表 2.9-7 为锻造的锥齿轮于温热锻造后、冷精压后与渗碳处理后的精度比较情况。

锥齿轮的齿距误差等的精度，受到温热锻造后的精度的控制，采用冷精压难以提高精度。

冷精压的目的在于：修整因温热锻造用金属模的磨耗等致使变了形的齿形形状和改善表面的粗糙度。

另外，采用多工位温锻或热精密模锻成形作为倒挡齿轮的预成形，而以冷锻精整来获得最终的齿形精度，已成为当前大批量生产汽车倒挡齿轮的最经济的方案。但温—冷联合成形工艺的设备投资相当大，投资后如得不到几百万件锻件订单的支持，则将陷入亏损的窘境。相比之下倒挡齿轮的全冷锻成形，可在一台设备上通过更换模具完成多道工序，设备投资较小，生产成本低于切削加工，适合于多品种中、小批量生产。

冷锻工艺与其他工艺组合成的复合工艺对于某种零件，采用简单的圆柱形和圆环形坯料在冷锻模具中一次成形，达

表 2.9-7　锻造锥齿轮的精度

μm

	齿间误差	齿距偏差	齿距误差	综合齿距误差
主动齿轮	17 (0)	17 (2)	12 (2)	16 (0)
电极	18 (0)	14 (2)	16 (2)	34 (1)
温锻	24 (1) ~53 (3)	14 (2) ~33 (3)	14 (2) ~26 (3)	31 (1) ~67 (2)
冷锻	21 (1) ~58 (3)	10 (1) ~25 (3)	10 (1) ~28 (3)	26 (1) ~71 (3)
渗碳	11 (0) ~46 (3)	13 (2) ~28 (3)	12 (2) ~18 (3)	21 (0) ~40 (2)
规格 JIS 0 级	20	7	6	22
JIS1 级	30	12	10	38
JIS2 级	45	22	17	37
JIS3 级	37	39	30	120

注：1. 2%抽样检查结果。
　　2. （ ）中的数字是 JIS 级别。

到所要求的形状和尺寸精度的技术，已经被越来越多的人所掌握。为了适应对冷锻件的高附加值、低成本要求，冷锻工艺渗透到温锻、镦锻成形、粉末冶金、冲压、铸造等领域，或者与这些工艺相结合，组合成复合工艺。其中预制坯温锻工艺目前得到了快速发展。即先用温锻使金属达到产品的近似净形，然后冷锻进行终成形提高精度，这样可以减少采用冷成形制造预制坯的道数。

8 多工序温冷复合精密模锻的特点及应用

虽然温锻成形工艺具有许多优点，但由于加热引起的坯料金属体积膨胀和轻微脱碳而影响锻件尺寸精度。温锻技术在国外已开发出很多年，但是直到近年才被应用于汽车制造业，锻造温度范围通常为750~850℃，材料屈服应力大致下降1/3，这就可显著减小挤压时模具所受的压力，同时可显著提高材料变形程度，减少工序和中间处理次数，并可应用于冷锻难于加工的材料。若采用温锻和冷锻相结合，则可显著提高温锻工艺的效果。采用先温锻后冷锻的复合工艺可得到仅用冷锻所能达到的尺寸精度和表面粗糙度，同时能减少工序数目，使用小吨位的压力机。轿车的发动机传动轴、变速箱、转向器中的弧齿锥齿轮、差速器齿轮、轿车轴、输入轴、离合器齿轮等二十余种零件国外已实现少无切削温冷锻件的大量生产。

更重要的是一些形状奇特相对尺寸变化大的复杂杯杆类零件，如轿车等速万向节钟形罩一般需要4~5个工步的多工位成形才能得到。对于这种零件，目前，日本、美国和俄罗斯均采用温锻成形和冷精整相结合的工艺，即基本的成形工序利用多工位温锻来实现，所得的工件经退火和磷化之后进行冷精整和冷缩径成形。同多工序冷锻相比，其能耗可降低到40%以下；同热精锻相比，锻件尺寸精度可升到7~9级。对于DOJ型壳体其内径部分可直接达到零件要求，即完全实现无切削加工；对于BJ型壳体，其最难机械加工的滚珠沟槽仅留0.13~0.38 mm（单边）的磨削量。

图2.9-45为BJ型等速万向节钟形套多工序温冷复合精锻工序，前3道前为温热锻造工序，分别为正挤杆部，头部镦粗、及挤带有6条滚珠球道的杯形头部。所得工件经过退火和磷化与皂化处理后，第4道工序为冷精整杯形底部；第5道工序为冷缩径，通过冷缩冷变形获得具有球形内腔和曲线滚珠球道的最终锻件。其球形内表面和滚珠球道内表面仅留约0.30 mm的磨削余量。

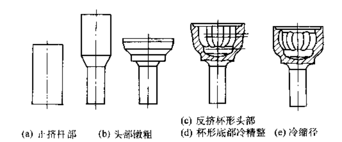


图2.9-45 钟形套多工序温冷复合精锻

通过试验和计算机模拟发现第3道工序杯形头部反挤（图2.9-45c）和第5道工序杯形头部的球形内型的冷缩径成形是关键。

（1）杯形头部反挤过程模拟及工艺优化

在模拟过程中还发现，当反挤冲头下行至第92步（整个反挤模拟过程分为159步）时，凹模 A 处小圆角（图2.9-46a）被充满，工件内对应于冲头外壁反而形成空隙，如图2.9-46c中 B 处所示，即该处毛坯与冲头外壁分离。当反挤冲头下行至154步时 B 处空隙消失，即毛坯再次与凸模壁接触。经观察分析认为，冲头从开始下行144步，其变形属于开式反挤压变形。对于钟形罩杯形头部绝对壁厚约为18 mm、相对壁厚（即与外径之比）约为0.18的情况下，出现空隙是金属反挤流动剧烈所致。当冲头下行至145步时，反挤形成的杯形端部与冲头的环形台肩相碰，由开式反挤转变为反挤和镦粗复合成形，由于镦粗的作用使 B 处空隙消失。

对于钟形罩毛坯反挤压工序，若采用开式反挤压，不仅大量的金属反向流动形成与杯形头部壁厚相等的纵向飞边，而且杯形内外底部均产生充不满的现象，得不到合格的毛坯；若采用闭式反挤，不仅要求下料极为准确，而且反挤变形结束时，反挤成形力急剧增大，导致模具磨损加剧甚至破裂。通过模拟发现，采用半闭式反挤压为宜，即在反挤冲头上对应于钟形罩锻件毛坯的顶部位置设计成锥形环带如图2.9-46b中 C 处所示。这样反挤结束时，在冲头与凹模间形成一个截面为锥形的环带分流降压空间。其尺寸通过模拟计算可得到最佳值。采用半闭式反挤压工艺，所得钟形罩毛坯，其纵向飞边的质量约为毛坯质量的2%，而其反挤成形力比开式反挤力的仅大8%~10%。

（2）杯形头部外轮廓形状及尺寸

杯形头部及反挤工序，除了获得具有球形底部和直壁的杯形内腔外，其杯形头部的外轮廓应为图2.9-47所示的形状，锥形段的高度尺寸 h 和锥角 α 是关键尺寸。在最后的缩径工序中，当杯形头部在凸模的作用通过凹模时，其锥形部分变成直壁导致金属主要产生径向流动使直壁内腔紧贴球形凸模而获得球形内腔。锥度 α 和高度尺寸 h 的最佳值，就是要保证在缩径时，金属的变形必须以径向流动为主，而轴向流动为辅。

（3）冷缩径工序中的回弹补偿

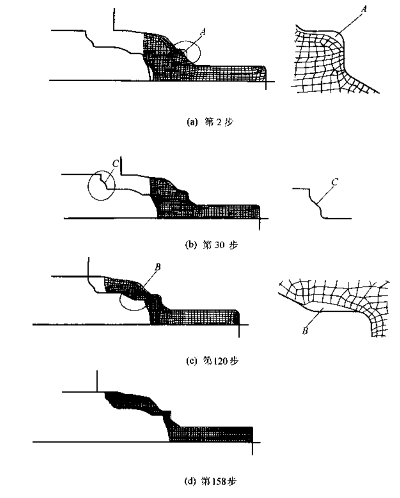
冷缩径变形过程如图2.9-48所示，通过冷缩径工序将图2.9-45所示钟形套预成形毛坯成形为钟形套精密模锻件。为了获得仅留0.3 mm的磨削余量的球形内腔，确保球形内腔和内腔上均匀分布的六条滚珠沟槽的尺寸精度，必须考虑冷缩径变形后的回弹及其补偿问题。通过采用弹塑性有限元模拟得到；工件与凸模间的回弹值较大应当考虑补偿问题；工件与凹模间的回弹值较小可以忽略不计。而补偿的方法就是将凸模端部的球形部分的直径按计算得到的回弹值减少即可。

（4）冷缩径模具

图2.9-49为钟形套冷缩径成形模具的一种结构。它分为凹模和凸模两个部分。凹模由凹模芯6凹模圈5组成，两者之间为过盈压配，其压配件通过压圈4与螺钉同凹模座1联为一体。凸模由凸模芯和凸模油缸组成，凸模芯由芯棒3和均匀相间的3个左凸模瓣2a与3个右凸模瓣2b构成。液压缸体13和底板14通过螺钉紧固为液压缸总成。芯棒3由固定环12通过螺钉联为一体，隔板8与导向套7由螺钉联为一体。模具安装在下传动液压机上使用，凹模固定在压力机上工作台的下平面上，凸模固定在压力机的活动工作台即滑块的上平面上。

其缩径工作过程为：凸模与滑块处于下限位置，将钟形套预成形工件套在组合凸模的球形头部上。开动压力机，滑块推动凸模向上行程，工件在凸模的推力作用下穿过凹模芯6完成径缩径成形如图2.9-49所示状态。完成缩径成形后，滑块带动凸模向下回程，首先芯棒3从组合凸模的球头中退出，相应的行程距离为S，此时活塞环与固定环间的油腔进油，而隔板与液压缸体内法兰间的液压缸排油；随着滑块继续下行，缸体内法兰带动导向筒7向下行程，首先由导向筒





(a) 第2步

(b) 第30步

(c) 第120步

(d) 第158步

图2.9-46 钟形套杯形头部反挤过程模拟（共159步）

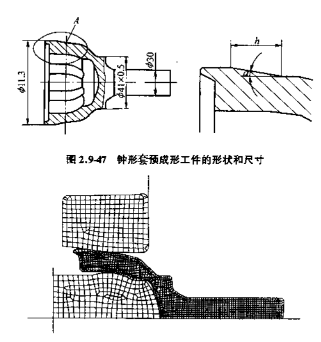


图2.9-47 钟形套预成形工件的形状和尺寸

图2.9-48 冷缩径成形过程的有限元模拟

7的3个斜面 A 带动3个左凸模瓣2a下行，在下行的同时，斜面 A 的水平分力推动2a沿径向内移动；然后，3个斜面 B 带动3个右凸模瓣2b在下行的同时也作向心移动，6瓣凸模块的径向移动距离等于或略大于钟形套球形内腔的半径与球口半径之差，以便两组凸模瓣相继从工件内腔中退出。当凸模随滑块下行至下限位置时，导向筒7、隔板8、活塞环10均处在液压缸体的上限位置，此时，液压系统对液压缸上腔进油，下腔排油，使组合凸模处于图2.9-49所示位置。特停留在凹模中的钟形套锻件，一个工作环循结束。

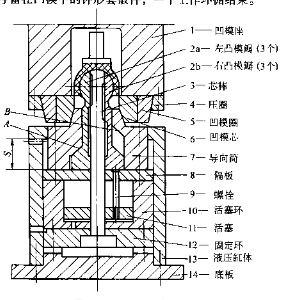


图2.9-49 冷缩径模具结构图



活塞 11 的作用必需予以说明，当凸模的芯棒 3 和液压缸 13、底板 14 下行距离 S 时，导向筒 7、隔板 8 和活塞环 10 是由下腔的压力油的背压所支承，而此时，下腔的压力油通过活塞 11 底部的通孔进入活塞 11 的下腔，将活塞 11 推向上限位置即隔板 8 的下面，固定在活塞 11 上的 6 个螺栓 9 穿过隔板 8 作用在 6 个凸模瓣的底面而避免凸模瓣处于悬空状态。

9 多层杯筒形零件流动控制成形

目前常用的多层杯筒形零件，有轿车安全气囊的压盖和壳体、涡旋式空调压缩机的涡旋体、多层电容器等铝合金产品，如图 2.9-50 所示。其中多层电容器的材料为 1070A、1060、1050A 纯铝，塑性好，变形抗力小，已在 20 世纪 70 年代中实现了冷挤压技术生产，而压盖、壳体和涡旋体等零件一般是采用高强度铝合金制造，因高强度铝合金塑性差，变形抗力大，加上这些零件复杂，轮廓尺寸较大且机械性能指标如 σ_b 要求极为严格，到目前为止还未能实现用塑性加工技术来生产。

国内，在这类零件的流动控制成形技术尚未开发成功前，采用铝合金棒材通过切削加工来获得所需的零件产品。

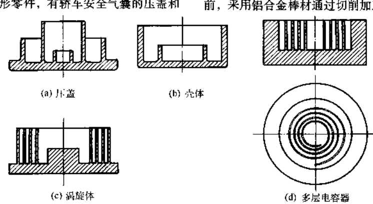


图 2.9-50 多层筒形零件

近年来，德国和日本率先开发出金属“流动控制成形”(Flow Control Forming，简称 FCF) 技术，实现了这些零件的闭式锻造成形。FCF 技术的特点在于：可以精确控制金属材料的非均匀塑性流动，提高其成形性能，可实现更加复杂的结构件的精密成形；可以有效避免折叠、充不满等缺陷的产生，使制件金属流线连续致密，提高产品的机械性能；可以使制件表面更加光洁，尺寸精度更高，其公差能达到 IT8～9 级。

金属流动控制成形（FCF）技术涉及到材料成形性能、成形工艺、模具技术、成形设备及前后配套工序等方面的专业知识，是当前金属精密成形领域内的前沿技术，也是国际塑性加工技术所关注的热点课题。

近年来，我国轿车与家电制造业迅猛发展，对于上述结构件产品的需求急剧增加。作者及课题组，自去年下半年以来，对轿车安全气囊的高强度铝合金压盖和壳体“流动控制精密成形技术”进行了较为深入的研究开发，并取得了成功。下面将工艺分析、成形力的计算及该技术的效果分别进行较为详细的论述。

（1）流动控制成形工艺分析

流动控制成形工艺的实质就是闭式模锻成形，即金属在外力作用下，在封闭的模膛内流动成形。该工艺有两个关键点：一是控制金属的流动方向和最后充满模膛的位置，以获得优质锻件；二是控制模锻成形力的大小，使其不能过分增大而影响模具的寿命，甚至影响设备的安全运行。要达到这两个目的，其关键技术是分流降压腔或工艺补偿空间的设计。下面以压盖为例，来分析其成形工艺及如何实现流动控制成形。

压盖零件的底部并非为圆形法兰，而是根据产品的不同，有四个均匀或者非均匀分布的凸耳。为了便于模锻成形，减少设备吨位和适当简化模具结构，其锻件沿凸耳的外切圆设计成整体圆形法兰。

根据压盖锻件底部带有法兰、上部为三层圆筒结构的特点，其流动控制成形工艺可以设计成反向闭式挤压模锻成形，如图 2.9-51 所示；也可以设计成正向闭式挤压模锻成形。

若采用反向闭式挤压模般成形（图 2.9-51），对于金属流动的控制腔，即分流降压腔的设计，有两种方案：其一，将控制腔设置在凹模法兰模膛底的周围，其形状为一扁平环形槽，如图 2.9-51a 中的 A 所示。模锻时，将圆饼状坯料放入凹模模膛，凸模施加压力，使坯料金属产生正向挤压变形，当所有圆筒形模膛充满后，坯料上少量多余金属（为了工艺的稳定性和获得合格锻件所必需的）被挤入控制腔而成环形小飞边。对环形小飞边可采用小间隙切边模切离。其二，将控制腔设置在模锻时最后充满的圆筒模膛的顶端，即将

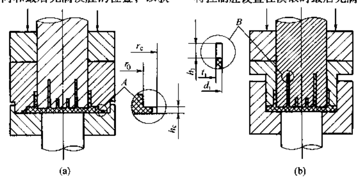


图 2.9-51 反向挤压模锻成形



圆筒形模膛设计得比锻件对应的圆筒长一些，如图 2.9-51b 中 B 所示，模锻时，当模膛部分充满后，多余金属则被挤入筒形控制腔，锻后采用车削加工的方法去掉。

若采用正向闭式挤压模锻成形仅将图 2.9-51 绕水平方向旋转 180°即可。同样对于金属流动控制腔有两种方案可供选择：其一、将控制腔设置在法兰模膛上端周围，其形状与大小同图 2.9-51a 相同；其二，设计在最后充满的圆筒模膛的顶端，则与图 2.9-51b 完全一样。

（2）控制腔（分流降压腔）的设计

1）横向环形控制腔的设计。环形控制腔的高度尺寸 h_c 与法兰模膛半径 $r_0\left(=\dfrac{d_0}{2}\right)$ 的近似关系为

$$h_c = 0.082r_0 \qquad (2.9\text{-}15)$$

环形控制腔外半径 r_c 的大小取为

$$r_c = (1.1\sim1.15)\ r_0 \qquad (2.9\text{-}16)$$

相应的环形控制腔的体积为

$$V_k = 0.06r_0^3 \qquad (2.9\text{-}17)$$

按式（2.9-17）计算出的环形控制腔的体积约等于坯料多余金属体积 2 倍，而多余金属体积为坯料体积的上偏差值与锻件体积的下偏差值之差。

2）纵向圆筒控制腔的设计。若将控制腔设置在模具的所有圆筒形模膛中最后充满的模膛的端部，首先必须作出判断，即对于厚度不同、高度也不同的模膛，到底其中哪个模膛最后充满？通常容易造成高度最大的模膛才是最后充满的错觉。

根据塑性成形最小流动阻力定律和试验观测，应当主要由模膛对变形金属的流动阻力的大小来判断。为此，作者提出可通过圆筒形模膛的高宽比或宽高比来判断，即

$$K = h/t \quad 或者 \quad 1/k = t/h \qquad (2.9\text{-}18)$$

式中，k 为圆筒形模膛的高宽比，h 为模膛高度，t 为模膛宽度。

对于压盖锻件，首先分别计算内、中、外筒的 h_1/t_1、h_2/t_2、h_3/t_3，得到 k_1、k_2、k_3 的具体数值，然后根据 k_1、k_2 和 k_3 的大小来做出判断。显然，k 值最大的圆筒形模膛端部才是模锻时最后充满的部位。因为当所有圆筒形模膛尺寸精度，尤其是模膛表面粗糙度在加工时保证严格一致的条件下，越是窄而深的模膛其流动阻力越大，无论是冷态挤压模锻还是热态挤压模锻，均是如此。

高度尺寸的确定，当所有圆筒形模膛中最后充满的模膛被确定后（若外径为 d_i，则内径为 d_i-2t_i），相应的控制腔的内径为 d_i-2t_i。因此仅需确定圆筒形控制腔的高度尺寸 h_i 即可。根据控制腔的体积约等于坯料上多余金属的 2 倍，即

$$\frac{\pi}{4}\left[d_i^2-(d_i-2t_i)^2\right]h_i \approx 2V_k$$

可得

$$h_i \approx \frac{2V_k}{\pi t_i\ (d_i-t_i)} \qquad (2.9\text{-}19)$$

（3）成形力的计算

流动控制成形力的大小与锻件材料、几何形状及尺寸大小相关，尤其是与流动成形控制腔的位置、形状与大小密切相关。

当采用图 2.9-51a 所示工艺方案时，其成形力可按用于计算任意形状锻件的闭式模锻力的公式计算。本文则着重探讨图 2.9-51b 所示工艺方案，即流动控制腔设置在圆筒形模膛的端部时成形力的计算方法。

对于回转体锻件闭式模锻，所有复杂锻件的轴向截面，均可分解为若干简单矩形单元，其变形区模型相当于各简单矩形截面区模型的组合。所以，只利用简单矩形截面的变形区模型计算出回转体闭式镦粗和反挤的变形力，然后将其叠加，就能计算出任意复杂锻件闭式模锻的变形力。

选择闭式反挤成形方案来分析。根据上述理论，所建立的压盖的成形力的计算模型如图 2.9-52 所示。

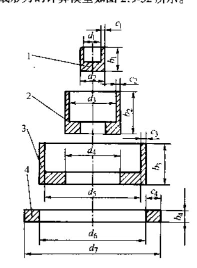


图 2.9-52　闭式挤压力的计算模型

由图 2.9-52 可以得出，总的成形力 P 为杯筒单元 1、2、3 闭式反挤成形力 P_1、P_2、P_3 和环形单元 4 的闭式成形力 P_4 之和。对于杯筒单元 2 和 3 的反挤压成形力 P_2 和 P_3 应当减去其直径分别为 d_2 和 d_4 的孔所对应的圆饼所需的成形力。由此，可以得出总的成形力 P 的计算公式为：

$$P = p_1\frac{\pi}{4}d_1^2 + p_2\frac{\pi}{4}\ (d_3^2-d_2^2)\ + p_3\frac{\pi}{4}\ (d_5^2-d_4^2)\ + p_4\frac{\pi}{4}\ (d_7^2-d_6^2) \qquad (2.9\text{-}20)$$

式中，p_1、p_2、p_3 分别为杯筒单元 1、2、3 的单位反挤压力，p_4 为环形单元 4 的单位成形压力。

这些单元体在流动控制成形时的单位压力计算公式如下：

$$p_1 = \sigma_s\left[\frac{d_2^2}{d_1^2}\ln\frac{d_2^2}{d_2^2-d_1^2} + (1+3\mu)\left(1+\ln\frac{d_2^2}{d_2^2-d_1^2}\right)\right] \qquad (2.9\text{-}21)$$

$$p_2 = \sigma_s\left[\frac{d_4^2}{d_3^2}\ln\frac{d_4^2}{d_4^2-d_3^2} + (1+3\mu)\left(1+\ln\frac{d_4^2}{d_4^2-d_3^2}\right)\right] \qquad (2.9\text{-}22)$$

$$p_3 = \sigma_s\left[\frac{d_6^2}{d_5^2}\ln\frac{d_6^2}{d_6^2-d_5^2} + (1+3\mu)\left(1+\ln\frac{d_6^2}{d_6^2-d_5^2}\right)\right] \qquad (2.9\text{-}23)$$

$$p_4 = \sigma_s\left(2+1.2\ln\frac{d_7-d_6}{2\times4.2}r\right) \qquad (2.9\text{-}24)$$

式中，r 为环形单元 4 外圆上、下端面的圆角半径，其余尺寸如图 2.9-52 所示。

压盖尺寸 $d_1\sim d_7$ 分别为 13.5、19、36、42.5、74、82、100 mm，当采用 2A12 铝合金时，考虑冷挤硬化，其 σ_s 约为 280 MPa。把以上数据代入式（2.9-21）～式（2.9-24），计算得到 $p_1\sim p_4$ 分别为 936、1 225、1 430、900 MPa。将 $p_1\sim p_4$ 和 $d_1\sim d_7$ 的数值代入式（2.9-20），得到总的成形力 P 为 7.42 MN，工艺试验时实测总的成形力为 806 t，相对实际成形力的误差为 8%。当采用 6A02 铝合金时，其成形力比

2A12小；而采用7A04铝合金时，其成形力比2A12大。但其计算值与实测值的误差均为8%左右。这表明，所提出的力的计算模型及导出的计算公式是合理可行的。

（4）工艺试验与效果

作者设计制造了两套可分凹模模具，安装在Y28—400/400型数控双动挤压机上进行试验。图2.9-53为分别为采用2A12、7A04试验成功的轿车安全气囊压盖和壳体的精密模锻件。



图2.9-53 压盖、壳体精密锻件

以压盖为例，零件质量为0.104 kg，精密锻件质量为0.360 kg；在精密模锻件未开发成功之前，某单位采用7A04超硬铝棒通过机加工试制和生产，单件用料1.2 kg，而我们所开发的精密模锻件质量为0.360 kg。不难算出，完全采用实心棒和机加工生产，材料利用率仅为8.7%，而采用流动控制成形实现精密模锻生产时，其材料利用率为30%，相对于机加工材料利用率提高3倍以上。生产压盖所用的7A04优质铝合金，其进口材料价格为50元/kg左右，国产的价格也超过30元/kg。采用流动控制成形新技术，一是节约了原材料，二是减少了机加工工作量，提高了工作效率，三是提高了产品质量，技术经济效益显著。

10 闭式冷精密模锻模具及设备

10.1 闭式冷精密模锻模具

目前，国内外均采用可分凹模模具来实现闭式冷精密模锻工艺。

图2.9-54为你期待公司研制的闭式模锻模具装置，安装在机械压力机上使用，模具的运动及其工作原理与液压机相同。这种模具装置可用于锥齿轮、十字轴、三销轴和星形套等模锻件的精密锻造。

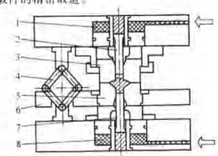
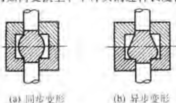


图2.9-54 带速比机构的模具结构

1，8—液压缸；2—上冲头；3—上凹模；4—比例调节机构；5—下凹模；6—中间板；7—下冲头

模锻时，模具闭合并压紧的压力由外部液压泵及蓄势器供给，液压缸镶装在模架之内，按照加压工作程序驱使上、下凹模闭合，其压力可以调节。

闭式模锻时，坯料的变形随上、下模运动速比的变化而变化，如图2.9-55所示，图2.9-55a为上、下冲头同步对向挤压，图2.9-55b为上、下冲头异步对向挤压。上下冲头动作的速度受速比调节机构的连杆长度之比所控制。图2.9-56所示可以说明如何变换上、下冲头的连杆长度比。



(a) 同步变形　　(b) 异步变形

图2.9-55 速比对变形的影响

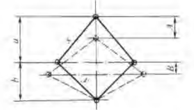


图2.9-56 调节机构速比的变化

高度方向对称的锻件如十字轴的闭式模锻采用上下冲头同步动作，连杆长度比 = 1；而高度方向不对称的圆锥齿轮的闭式模锻则上下冲头采用异步动作。

x，y，a，b，A 及 B 的相互关系

$$x^2 - a^2 = y^2 - b^2$$

$$x^2 - (a - A + B)^2 = y^2 - (b - B)^2$$

从上式

$$B = \frac{aA - 0.5A^2}{a + b - A}$$

按上式

如连比是1∶1，即 $A = 2B$，则 $b = a$

如连比是2∶1，即 $A = 3B$，则 $b = 2a - 0.5A$

图2.9-57所示闭式模锻模具，该模具由通用模架和可更换的凸、凹模工作部分组成。通用模架为上、下凹模模座及导柱导套组成。该模具安装在数控双动挤压液压机（图2.9-59）上使用，下半凹模安装在压力机的工作台上，上半凹模安装在压力机的外滑块上，凸模（冲头）安装在压力机的内滑块上。

其工作过程为：当压力机内、外滑块均处在上限位置时，将坯料置于下半凹模模膛内，开动压力机，首先外滑块下行使上半凹模与下半凹模闭合并压紧，然后，内滑块下行通过冲头对坯料施加压力，使坯料变形充满凹模模膛。变形结束后，首先内滑块回程带动冲头从凹模中退出，然后外滑块回程带动上半凹模与下半凹模分离，取出锻件，一个工作循环结束。

该模具结构，通过更换上、下凹模、冲头及少量相关零件，可以进行轿车等速万向节的星形套、三销轴和圆锥齿轮等零件闭式冷态精密模锻。

10.2 闭式冷精密模锻设备

冷精密模锻设备同热精密模锻设备的区别，主要在于冷精密模锻设备的工作速度即变形行程速度比热的变形行程速度慢。因此，下面着重介绍两种闭式模锻液压机。

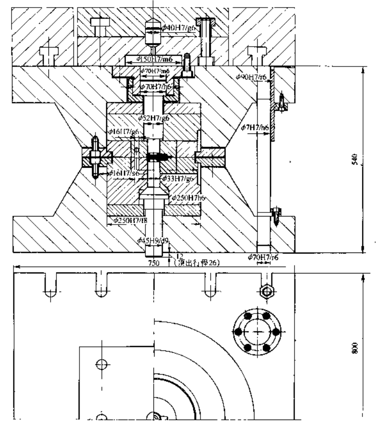


图 2.9-57　双动压力机用闭式锻模

日本你期待股份有限公司开发的计算机控制的三缸液压机结构原理见图 2.9-58，其主要组成部分为：主体结构（主滑块、内滑块、床滑块）；液压传动系统；电气控制系统（主操作台、辅助操作台、功率显示板）；计算机（建立成形情况的图像显示和数据记录）；伺服控制；带速比调节的成套模具装置等。这种全液压闭式模锻压力机内滑块加压速度均为 20 mm/s 左右，主要用于十字轴及锥齿轮等的闭式冷精锻或闭式半温锻。

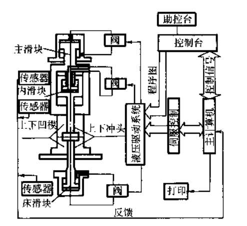


图 2.9-58　全液压闭式模锻压力机结构原理图

日本三菱重工研制的微机控制的全液压闭式模锻压力机也是采用上下冲头对挤，其型号为 MCF450 和 MCF1100，相应最大压力为 4.5 MN 和 11 MN。

图 2.9-59 为原华中理工大学与黄石锻压机床有限公司共同设计制造的 Y28—400/400 型数控双动挤压液压机，内、外滑块公称压力均为 4 MN，下顶缸压力为 2 MN，内、外滑块空程速度为 300 mm/s，内滑块加压速度为 20 mm/s，压力、位移、速度等参数均由计算机控制、调节与显示。图 2.9-57 所闭式模锻模就是在该压力机上使用的模具之一，图 2.9-53 所示轿车安全气囊高强度铝合金压盖，壳体精密锻件则是利用另一种模具安装在该压力机上试验和生产的。

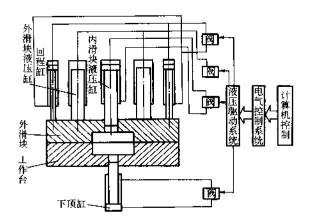


图 2.9-59　Y28～400/400 型数控双动挤压液压机

编写：夏巨谌（华中科技大学）

参考文献

1 中国机械工程学会锻压学会，锻压手册，第 1 卷，锻造，第二版，北京：机械工业出版社，2002

2 郭会光．我国大锻件制造业的发展．大型铸锻件，2003（1）

3 刘助柏．塑性成型新技术及其力学原理．北京：机械工业出版社，1995

4 张志文．锻造工艺学．北京：机械工业出版社，1998

5 西北工业大学有色金属编写组．有色金属锻造．北京：国防工业出版社，1997

6 中国机械工程学会，中国模具设计大典编委会．中国模具设计大典：第 4 卷，锻模与粉末冶金模具设计．南昌：江西科学技术出版社，2002

7 安藤弘行［日］．温热锻造．锻造工业，1995，No7

8 夏巨谌．精密塑性成形工艺．北京：机械工业出版社，1999

9 谢谈，贾德伟，尉哲，李源．冷闭塞锻造成套技术开发与产业化．南京：第 1 届全国精密锻造学术研讨会论文集，2001

10 徐祥龙，龚爱军．齿轮冷锻成形在汽车齿形零件制造中的应用，南京：第 1 届全国精密锻造学术研讨会论文集，2001

11 Hyoji Yoshimura，Katsuhisa TanaKa，precision forging of aluminum andSteel，Journal of Materials processing Technology，98（2000）：196～204

12 Wang Huajun Xia Juchen Hu Guoan Finite element Simulation and optimization of multistage wam/hot forming for outer race Chinese Journal of Mechnical engineering，2002，（4）：339～343

13 寇淑清，杨慎华，傅沛福，夏晓峰．高精度直齿圆柱齿轮冷锻成形加工方法的研究．锻压技术，2000，（5）：10～13

14 蒋鹏，罗宋靖，谢谈，胡福荣．国内精密锻造技术的近期状况．锻压技术，2002，（3）：12～15

15 钱荣芳．基于芯轴交换的圆柱齿轮复动挤压成形．锻压技术，2002，（1）1～3

16 张猛，黄进富．汽车用交流发电机磁轭的净形加工新工艺．锻压技术．2003，（1）：6～8

17 夏巨谌，胡国安，王新云等．多层杯筒形零件流动控制成形工艺分析及成形力的计算．中国机械，工程，2004，15：91～93

18 程羽，李钢，郭成等．齿轮冷精锻成形工艺研究．锻压技术，2003，（2）：11～12

19 夏巨谌，胡国安，王新云等．轿车安全气囊零件流动控制成形技术研究．锻压技术，2004，（1）：1～3

20 锻模设计手册编写组．锻模设计手册．北京：机械工业出版社，1991

21 中国机械工程学会．锻压手册：第 3 卷，锻压车间设备．北京：机械工业出版社，1998


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第 3 篇

板料冲压成形

主 编 杨 合 华 林 刘郁丽

编 写 杨 合 华 林 刘郁丽
涂光祺 卢险峰 崔令江
郭 成 毛华杰 赵玉民

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET

第1章　冲压成形工艺基础

1　冲压成形工艺分类

冲压成形零件的形状多种多样，所采用的冲压工艺方法也是多种多样的。概括起来，可以把全部的冲压工艺方法大致归纳为分离工序与成形工序两大类。

分离工序的目的是通过冲压使板料沿一定的轮廓线相互分离，同时，分离断面质量也要满足要求。成形工序的目的是使毛坯在不产生破坏的条件下发生塑性变形，以获得形状、尺寸和精度都满足要求的产品。

分离工序与成形工序的特点及应用范围的举例分别列于表3.1-1和表3.1-2中。

表3.1-1　分离工序

工序名称	简　　图	特点及应用范围
切断		沿不封闭的轮廓线分离，应用于冲压毛坯的下料或形状简单零件的加工
落料		沿封闭的轮廓曲线实现分离，用以加工各种形状的平板型冲压件
冲孔		在零件上加工各种形状的孔
修边		在冲压半成品的平面或曲面上沿一定的轮廓曲线修切边缘
剖切		把经过整体成形获得的半成品，沿一定的轮廓剖切成两个或更多个冲压件
切口		沿不封闭的轮廓曲线断开而不完全分离成两个部分
精冲		在冲裁的基础上，采取强烈的齿圈压边与反顶力、近乎零的小间隙及有小圆角刃口等工艺措施而实现板料的塑性分离

表3.1-2　成形工序

工序名称	简　　图	特点及应用范围
压弯		用冲模将板料毛坯沿直线弯曲成各种形状，可以制造形状很复杂的零件
滚弯		用辊子（2～4个）的回转实现板料的逐步弯曲加工，用于各种容器直筒部分及轮圈的成形等
卷弯		用模具对毛坯的一端进行弯曲的加工方法，常用于铰链的制造等
纵向辊弯成形		用多对成形辊，沿纵向使带料逐渐弯曲的方法，用于型材、管材和各种异形管的加工
拉弯		在施加拉力的条件下实现弯曲加工，多用于大曲率半径和精度要求高的零件的成形
曲面零件拉深成形		坯料外法兰部分有缩小、内法兰部分有伸长的非直壁或非平底空心零件的冲压成形方法
拉深		各种形状的直壁空心零件的冲压成形，可以采用多次拉深工序制造高度很大的空心零件
胀形		对平板毛坯或空心毛坯的局部进行变形并使板材厚度变薄的成形方法

续表 3.1-2

工序名称	简　图	特点及应用范围
平面翻边		在毛坯或半成品的平面边缘部分按圆弧或曲线翻成竖直边缘的成形方法
曲面翻边		在毛坯或半成品的曲面边缘部分按圆弧或曲线翻成与曲面垂直（法向）的竖直边缘的成形方法
缩口		在空心毛坯的一端缩小口部直径的成形方法
扩口		在空心毛坯的一端使口部尺寸扩大的成形方法
卷边		对空心毛坯的开口端部或管材的一端卷弯成小曲率的曲面形状的成形方法
校形（整形）		用模具表面对毛坯的局部或整体施加法向接触压力，达到提高零件尺寸精度或获得细微而明显的过渡形状的成形方法

全部冲压工艺的进一步分类（以其基本工序为单元）有：

对于分离工序大类，按材料变形部位产生断裂分离的机理之不同，将其分为：冲裁、整修、精密冲裁（简称精冲）、半精密冲裁（简称半精冲）4 小类。

对于成形工序大类，按材料变形部位产生塑性变形力学特点的差别，将其分为压缩类成形、拉伸类成形、复合类成形 3 小类。

当今，在板料冲压性能研究中所取得的理论与实践成果，也正是以此种冲压工艺分类理论和认识为基础的。

2　冲压成形用原材料

冲压成形所用到的板料包括金属板料与非金属板料两大类。金属板料分为铁金属（黑色金属）与非铁金属（有色金属）板料两类。铁金属板料中主要用到薄钢板及不锈钢板，非铁金属板料中主要用到铝及其合金板、铜及其合金板、钛及其合金板等。可以认为冲压成形中常用各种金属板料的数量比例是依此顺序而从大到小的。

2.1　冲压常用板料规格与力学性能

（1）钢板、钢带

1）板（带）料尺寸规格　一些钢板与钢带的尺寸规格见表 3.1-3 ~ 表 3.1-13。

表 3.1-3　钢板品种与常用规格举例

类别	品　种	名　称	厚度/mm
普通钢板	热轧普通厚钢板（t > 4 mm） 热轧普通薄钢板（t ≤ 4 mm） 冷轧普通薄钢板（t ≤ 4 mm）	汽车大梁用钢板 锅炉钢板 普通碳素钢钢板 低合金钢钢板 花纹钢板 镀锌薄钢板 桥梁用钢板 造船用钢板	2.5 ~ 10 4.5 ~ 120 0.3 ~ 120 1.0 ~ 120 3.0 ~ 7 0.3 ~ 2.0 4.5 ~ 50 1.0 ~ 120
优质钢板	（与上述三个品种相对应）	碳素结构钢钢板 合金结构钢钢板 高速工具钢钢板 弹簧钢板 不锈钢板	0.5 ~ 120 1.0 ~ 50 1.0 ~ 8 1.0 ~ 20 0.5 ~ 20
复合钢板		不锈复合厚钢板 塑料复合薄钢板 犁铧用三层钢板	6 ~ 30 0.35 ~ 2.0 7 ~ 9

表 3.1-4　钢带品种及常用规格举例

类别	品　种	名　称	厚度/mm
普通钢带	热轧普通钢钢带 冷轧普通钢钢带	普通碳素钢钢带 镀锡钢带 软管用钢带	2.5 ~ 6（热轧） 0.05 ~ 4（冷轧） 0.08 ~ 0.6（冷轧） 0.25 ~ 0.7（冷轧）
优质钢带	（与上述两个品种相对应）	碳素结构钢钢带 合金结构钢钢带 高速工具钢钢带 弹簧钢带 不锈钢带	2.5 ~ 7（热轧） 0.05 ~ 3（冷轧） 0.25 ~ 3（冷轧） 1 ~ 1.5（冷轧） 2.5 ~ 6（热轧） 0.05 ~ 3（冷轧） 2.5 ~ 9（热轧） 0.05 ~ 2.5（冷轧）



表 3.1-5　专用钢带品种举例

名　称	执行标准或规格	生产厂家	名　称	执行标准或规格	生产厂家
自行车用冷轧钢带	YB/T 5067—1993	首钢带钢厂	带落砂孔石材锯条钢带	65Mn 6×180×(3 300～4 500)	首钢带钢厂
自行车链条用冷轧钢带	(例：20MnSi 1.25×81) YB/T 5064—1993		手表、照相机及各种阀片用热处理弹簧钢带	65Mn，T10A (0.2～1.0)×(5～40)	
电梯选层器用调质钢带	65Mn　0.4×25				

表 3.1-6　轧制薄钢板的尺寸（摘自 GB/T 708—1988）　mm

钢板厚度	钢板宽度												
	500	600	710	750	800	850	900	950	1 000	1 100	1 250	1 400	1 500
	冷轧钢板长度												
0.2，0.25	1 200	1 420	1 500	1 500	1 500								
0.3，0.4	1 000	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 500	1 500					
	1 500	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	1 800	2 000					
0.5，0.55		1 200	1 420	1 500	1 500	1 500							
0.6	1 000	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 500	1 500					
	1 500	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	1 800	2 000					
0.7，0.75		1 200	1 420	1 500	1 500	1 500							
	1 000	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 500	1 500					
	1 500	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	1 800	2 000					
0.8，0.9		1 200	1 420	1 500	1 500	1 500	1 500						
	1 000	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 500	2 000	2 000			
	1 500	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 200	2 500			
1.0，1.1	1 000	1 200	1 420	1 500	1 500	1 500					2 800	2 800	
1.2，1.4	1 500	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800		2 000	2 000	3 000	3 000	
1.5，1.6													
1.8，2.0	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 200	2 500	3 500	3 500	
2.2，2.5	500	600											
2.8，3.0	1 000	1 200	1 420	1 500	1 500	1 500							
3.2，3.5	1 500	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	2 000					
3.8，4.0	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000							
	热轧钢板长度												
0.35，0.4		1 200		1 000									
0.45，0.5	1 000	1 500	1 000	1 500	1 500		1 500	1 500					
0.55，0.6	1 500	1 800	1 420	1 800	1 600	1 700	1 800	1 900	1 500				
0.7，0.75	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000				
0.8，0.9				1 500	1 500	1 500	1 500	1 500					
	1 000	1 200	1 420	1 800	1 600	1 700	1 800	1 900	1 500				
	1 500	1 420	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000				
1.0，1.1				1 000			1 000						
1.2，1.25	1 000	1 200	1 000	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500					
1.4，1.5	1 500	1 420	1 420	1 800	1 600	1 700	1 800	1 900	1 500				
1.6，1.8	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000				
2.0，2.2							1 000						



续表 3.1-6

钢板厚度	钢板宽度												
	500	600	710	750	800	850	900	950	1 000	1 100	1 250	1 400	1 500
	冷轧钢板长度												
2.5、2.8	500	600	1 000	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	2 200	2 500	2 800	
	1 000	1 200	1 420	1 800	1 600	1 700	1 800	1 900	2 000	3 000	3 000	3 000	3 000
	1 500	1 500	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	3 000	4 000	4 000	4 000	4 000
3.0，3.2				1 000			1 000					2 800	
3.5，3.8				1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	2 000	2 200	2 500	3 000	3 000
4.0	500	600	1 420	1 800	1 600	1 700	1 800	1 900	3 000	3 000	3 000	3 500	3 500
	1 000	1 200	1 200	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000

表 3.1-7　钢板厚度允差（摘自 GB/T 708—1988）　　mm

钢板厚度	A	B	C	
	高级精度	较高精度	普通精度	
	冷轧优质钢板	普通和优质钢板		
		冷轧和热轧	热轧	
	全部宽度		宽度＜1 000	宽度≥1 000
0.2～0.4	±0.03	±0.04	±0.06	±0.06
0.45～0.5	±0.04	±0.05	±0.07	±0.07
0.55～0.60	±0.05	±0.06	±0.08	±0.08
0.70～0.75	±0.06	±0.07	±0.09	±0.09
1.0～1.1	±0.07	±0.09	±0.12	±0.12
1.2～1.25	±0.09	±0.11	±0.13	±0.13
1.4	±0.10	±0.12	±0.15	±0.15
1.5	±0.11	±0.12	±0.15	±0.15
1.6～1.8	±0.12	±0.14	±0.16	±0.16
2.0	±0.13	±0.15	+0.15 −0.18	±0.18
2.2	±0.14	±0.16	+0.15 −0.19	±0.19
2.5	±0.15	±0.17	+0.16 −0.20	±0.20
2.8～3.0	±0.16	±0.18	+0.17 −0.22	±0.22
3.2～3.5	±0.18	±0.20	+0.18 −0.25	±0.25
3.8～4.0	±0.20	±0.22	+0.20 −0.30	±0.30

表 3.1-8　热轧厚钢板的尺寸（摘自 GB/T 709—1988）　　mm

厚　度	宽　度									
	600～1 200	1 200～1 500	1 500～1 600	1 600～1 700	1 700～1 800	1 800～2 000	2 000～2 200	2 200～2 500	2 500～2 800	2 800～3 000
	最大长度									
4.5～5.5	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	6 000	—	—	—	—
6～7	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	10 000	—	—	—	—
8～10	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	9 000	9 000	—	—
11～15	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	12 000	9 000	8 000	8 000	8 000
16～20	12 000	12 000	12 000	10 000	10 000	9 000	8 000	7 000	7 000	7 000
21～25	12 000	11 000	11 000	10 000	9 000	8 000	7 000	6 000	6 000	6 000
26～30	12 000	10 000	9 000	9 000	9 000	8 000	7 000	6 000	6 000	6 000
32～34	12 000	9 000	8 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	6 000	5 000
36～40	10 000	8 000	7 000	7 000	6 500	6 500	5 500	5 500	5 000	—
42～50	9 000	8 000	7 000	7 000	6 500	6 000	5 000	4 000	—	—
52～60	8 000	6 000	6 000	6 000	5 500	5 000	4 500	4 000	—	—

表 3.1-9 钢板的理论重量

厚度/mm	理论重量 /kg·m⁻²	厚度/mm	理论质量 /kg·m⁻²
0.2	1.570	1.6	12.56
0.25	1.963	1.8	14.13
0.3	2.355	2.0	15.70
0.4	3.140	2.2	17.27
0.45	3.533	2.5	19.63
0.5	3.925	2.8	21.98
0.55	4.318	3.0	23.55
0.6	4.710	3.2	25.12
0.7	5.495	3.5	27.48
0.75	5.888	3.8	29.83
0.8	6.280	4.0	31.40
0.9	7.065	4.5	35.33
1.0	7.850	5.0	39.25
1.1	8.635	5.5	43.18
1.2	9.420	6.0	47.10
1.25	9.813	7.0	54.95
1.4	10.99	8.0	62.80
1.5	11.78	9.0	70.65

表 3.1-10 碳素钢热轧钢带尺寸（摘自 GB/T 3524—1992）

mm

厚　度	宽　度
2.0, 2.25	50, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160
2.5, 2.75	50, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200
3.0, 3.25, 3.5, 4.0, 4.25, 4.5, 4.75, 5.0, 5.25, 5.5, 5.75, 6.0	50, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 290, 300

注：碳素钢热轧钢带，钢号在合同中注明，其化学成分和力学性能应符合 GB/T 700—1988 中的规定。

表 3.1-11 碳素钢冷轧钢带的分类（摘自 GB/T 716—1991）

按制造精度分		按力学性能分	
名称	符号	名称	符号
普通精度钢带 宽度精度较高钢带 厚度精度较高钢带 宽度和厚度精度较高钢带	P K H KH	软钢带 半软钢带 冷硬钢带	R BR Y
按边缘状态分		按表面质量分	
名称	符号	名称	符号
切边钢带 不切边钢带	Q BQ	Ⅰ组钢带 Ⅱ组钢带	Ⅰ Ⅱ

表 3.1-12 碳素钢冷轧钢带尺寸（摘自 GB/T 716—1991）

mm

厚　度	宽度
0.05, 0.06, 0.08	5 ~ 100
0.10	5 ~ 150
0.15, 0.20, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.20, 1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50	10 ~ 200
1.60, 1.70, 1.80, 1.90, 2.00, 2.10, 2.20, 2.30, 2.40, 2.50, 2.60, 2.70, 2.80, 2.90, 3.00	50 ~ 200

注：宽度在 150 mm 以下的，按 5 mm 进级；大于 150 mm 的，按 10 mm 进级。

表 3.1-13 优质碳素钢冷轧钢带尺寸
（摘自 GB/T 716—1991）　　mm

厚度	0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15, 0.18, 0.20, 0.22, 0.25, 0.28, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95, 1.00, 1.05, 1.10, 1.15, 1.20, 1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60, 1.65, 1.70, 1.75, 1.80, 1.85, 1.90, 1.95, 2.00, 2.10, 2.20, 2.30, 2.40, 2.50, 2.60, 2.70, 2.80, 2.90, 3.00, 3.10, 3.20, 3.30, 3.40, 3.50, 3.60
宽度	4 ~ 20（按 1 mm 进级），22 ~ 40（按 2 mm 进级），43, 46, 50, 53, 56, 60, 63, 66, 70, 73, 76, 80, 83, 86, 90, 93, 96, 100, 105 ~ 250（按 5 mm 进级），260, 270, 280, 290, 300,

注：宽度在 0.2 mm 以下的钢带，只订制 TR（特级）及 Y（硬）两种。

2）性能规格标准

① 碳素结构钢　碳素结构钢钢材适用于一般结构件和工程用金属构件，钢材品种为热轧钢板、型钢，可供焊接、铆接、栓接构件用。一般在供应状态下使用。碳素结构钢的化学成分、力学性能按 GB/T 700—1988 的规定。

② 深冲冷轧薄钢板　深冲冷轧薄钢板属于优质碳素钢，其主要牌号有 08Al、08F、08、10、15、20 号钢 6 种。它们的化学成分及力学性能指标见表 3.1-14 ~ 表 3.1-16。

表 3.1-14 深冲冷轧薄钢板的化学成分
（摘自 GB/T 5213—2001、GB/T 710—1991）

钢号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al
08Al	≤ 0.08	痕量	0.35 ~ 0.45	≤ 0.020	≤ 0.03	≤ 0.10	≤ 0.03	≤ 0.15	0.02 ~ 0.07
08F	0.05 ~ 0.11	≤ 0.03	0.25 ~ 0.50	≤ 0.040	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.10	≤ 0.25	—
08	0.05 ~ 0.12	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤ 0.035	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.10	≤ 0.25	—
10	0.07 ~ 0.14	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤ 0.035	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.15	≤ 0.25	—
15	0.12 ~ 0.19	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤ 0.040	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.25	—
20	0.17 ~ 0.24	0.17 ~ 0.37	0.35 ~ 0.65	≤ 0.040	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.25	—



表 3.1-15　深冲冷轧薄钢板的力学性能
（摘自 GB/T 5213—2001、GB/T 710—1991）

钢号	级别	厚度/mm	σ_b/MPa	σ_s /MPa	δ_{10} /%	σ_s/σ_b
				≥		
08A1①	ZF	全部	260～330	200	44	0.66
	HF	全部	260～340	210	42	0.70
		>1.2	260～350	220	39	—
	F	1.2	260～350	220	42	—
		<1.2	260～350	240	42	—
08F②	Z	≤4	280～370	—	34	—
	S		280～390	—	32	—
	P		280～390	—	30	—
08	Z	≤4	280～400	—	32	—
	S		280～420	—	30	—
	P		260～420	—	28	—
10	Z	≤4	300～420	—	30	—
	S		300～440	—	29	—
	P		300～440	—	28	—
15	Z	≤4	340～460	—	27	—
	S		360～480	—	26	—
	P		360～480	—	25	—
20	Z	≤4	360～500	—	26	—
	S		360～510	—	25	—
	P		360～510	—	24	—

① 铝镇静钢 08A1 按其拉深质量分为三级：ZF 为拉深最复杂零件；HF 为拉深很复杂零件；F 为拉深复杂零件。
② 其它深冲薄钢板（包括热轧板）按冲压性能分级为：Z 为最深拉深级；S 为深拉深级；P 为普通拉深级。

表 3.1-16　深冲冷轧薄板的杯突试验值
（摘自 GB/T 5213—2001、GB/T 710—1991）

钢板厚度/mm	钢号及级别							
	08A1			08、08F			10、15、20	
	ZF	HF	F	Z	S	P	Z	S
	E_r 值（杯突试验深度）/mm ≥							
0.5	—	—	—	9.0	8.4	8.0	8.0	7.4
0.6	—	—	—	9.4	8.9	8.5	8.4	7.8
0.7	—	—	—	9.7	9.2	8.9	8.6	8.0
0.8	10.6	10.5	10.3	10.0	9.5	9.3	8.8	8.2
0.9	10.8	10.7	10.5	10.3	9.9	9.6	9.0	8.4
1.0	11.2	10.8	10.7	10.5	10.1	9.9	9.2	8.6
1.1	11.3	11.0	10.9	10.8	10.4	10.2	—	—
1.2	11.5	11.2	11.1	11.0	10.6	10.4	—	—
1.3	11.7	11.3	11.3	11.2	10.8	10.6	—	—
1.4	11.8	11.4	11.4	11.3	11.0	10.8	—	—

续表 3.1-16

钢板厚度/mm	钢号及级别							
	08A1			08、08F			10、15、20	
	ZF	HF	F	Z	S	P	Z	S
	E_r 值（杯突试验深度）/mm ≥							
1.5	12.0	11.6	11.5	11.5	11.2	11.0	—	—
1.6	—	11.8	11.7	11.6	11.4	11.2	—	—
1.7	—	12.0	11.9	11.8	11.6	11.4	—	—
1.8	—	12.1	12.0	11.9	11.7	11.5	—	—
1.9	—	12.2	12.1	12.0	11.8	11.7	—	—
2.0	—	12.3	12.2	12.1	11.9	11.8	—	—

（2）有色金属板材与带材

常用有色金属及其合金板材的供货状态、力学性能指标及尺寸规格见表 3.1-17～表 3.1-22。

表 3.1-17　铜板、铜带的供应状态

铜板名称	供应状态	执行标准	铜带名称	供应状态	执行标准
紫铜板	热轧（R） 软（M） 硬（Y）	GB/T 2040—2002	纯铜带	（R） （M） （Y）	GB/T 2059—2000
黄铜板	热轧（R） 软（M） 半硬（Y_2） 硬（Y） 特硬（T）	GB/T 2040—2002	黄铜带	（M） （Y_2） （Y） （T）	GB/T 2059—2000
铝青铜板	软（M） 半硬（Y_2） 硬（Y）	GB/T 2040—2002	铝青铜带	（M） （Y_2） （Y） （T）	GB/T 2059—2000
锰青铜板 硅青铜板	软（M） 硬（Y） 特硬（T）	GB/T 2046—1980 GB/T 2047—1980	锰青铜带 硅青铜带	（M） （Y） （T）	GB/T 14596—1993
锡青铜板	热轧（R） 软（M） 半硬（Y_2） 硬（Y） 特硬（T）	GB/T 2040—2002	锡青铜带	（M） （Y_2） （Y） （T）	GB/T 2059—2000
锡锌铅青铜板	软（M） 1/3 硬（Y_3） 半硬（Y_2） 硬（Y）	GB/T 2049—1980	锡锌铅青铜带	（M） （Y_3） （Y_2） （Y）	GB/T 14596—1993



表 3.1-18 铝、铜板材的力学性能

品种	牌号	交货状态								
		软态（M）			1/2硬态（Y_2）			硬态（Y）		
		厚度/mm	σ_b/MPa	δ/%	厚度/mm	σ_b/MPa	δ/%	厚度/mm	σ_b/MPa	δ/%
板材、条材	ZA11	0.3～2.5	≤230	12	—	—	—	—	—	—
	ZA12	0.3～4.0	≤220	14	—	—	—	—	—	—
	H68	0.5～10	300	40	0.5～10.0	350	25	0.5～10.0	400	15
	H62	0.5～10	300	40	0.5～10.0	350	20	0.5～10.0	420	10
带材、箔材	1070A、1060 1050A 1035、1200 H68 H62 T3、T4、TUP	0.007 5～0.011 0.012～0.04 0.5～1.5 0.5～1.5 0.5～1.5	30 30 300 300 210	0.5 2.0 40 35 30	— — 0.5～1.5 0.5～1.5 —	— — 350 380 —	— — 25 20 —	0.007 5～0.011 0.012～0.04 0.5～1.5 0.5～1.5 0.5～1.5	100 100 400 420 300	— 0.5 15 10 3

表 3.1-19 常用航空有色金属板材的力学性能

性能 牌号	$\sigma_{0.2}$/MPa	σ_b/MPa	$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_b}$	δ/%	ψ/%	$n=\varepsilon_j$	$c=\frac{\sigma_j}{\varepsilon_j^n}$/MPa	γ	E/MPa
3A21O	63	106	0.59	30	80	0.21	177	0.44	71 000
5A02O	90	177	0.51	20	70	0.16	275	0.63	
5A12O	104	166	0.63	19	53	0.13	246	0.64	71 000
2A12T4	295	457	0.65	15.6	35	0.13	681		71 000
7A04O	100	210	0.48	17	52	0.12	305		71 000
7A04T4	491	576	0.85	10.3	25.2	0.04	637		71 000
MB8	211	270	0.78	15～20	25～30	0.11	384		41 000
T2	174	220	0.79	43	61	0.27	411	1.09	110 000
H62	161	320	0.5	50	58	0.38	672	1.00	
TC1	460～650	600～750	0.8～0.85	(20～35)	30～50	0.08～0.09			110 000

表 3.1-20 铝及合金板的厚度、宽度允差 mm

厚度	板料宽度								宽度公差
	400 500	600	800	1 000	1 200	1 400	1 500	2 000	
	厚度公差								
0.3	-0.05								
0.4	-0.05								
0.5	-0.05	-0.05	-0.08	-0.10	-0.12				宽度≤1 000者
0.6	-0.05	-0.06	-0.10	-0.12	-0.12				
0.8	-0.08	-0.08	-0.12	-0.12	-0.13	-0.14	-0.14		为$^{+5}_{-3}$
1.0	-0.10	-0.10	-0.15	-0.15	-0.16	-0.17	-0.17		
1.2	-0.10	-0.10	-0.10	-0.15	-0.16	-0.17	-0.17		
1.5	-0.15	-0.15	-0.20	-0.20	-0.22	-0.25	-0.25	-0.27	宽度＞1 000者
1.8	-0.15	-0.15	-0.20	-0.20	-0.22	-0.25	-0.25	-0.27	
2.0	-0.15	-0.15	-0.20	-0.20	-0.24	-0.26	-0.26	-0.28	
2.5	-0.20	-0.20	-0.25	-0.25	-0.28	-0.29	-0.29	-0.30	为$^{+10}_{-5}$
3.0	-0.25	-0.25	-0.30	-0.30	-0.33	-0.34	-0.34	-0.35	



表 3.1-21 铜板厚度尺寸允差 mm

厚度	黄铜板 宽 200～500		宽度和长度 700×1 430		800×1 500		1 000×2 000	
	厚度允差							
	普通级	较高级	纯铜	黄铜	纯铜	黄铜	纯铜	黄铜
0.4	-0.07	—	-0.09	—	—	—	—	—
0.45	-0.07	—	-0.09	—	—	—	—	—
0.5	-0.07	—	-0.09	—	—	—	—	—
0.6	-0.07	—	-0.09	-0.09	—	—	—	—
0.7	-0.07	—	-0.10	-0.10	—	—	—	—
0.8	-0.08	—	-0.10	-0.10	—	—	—	—
0.9	-0.08	—	-0.10	-0.10	-0.12	-0.12	-0.15	—
1.0	-0.09	—	-0.12	-0.12	-0.14	-0.12	-0.17	—
1.1	-0.09	-0.08	-0.12	-0.12	-0.14	-0.12	-0.17	—
1.2	-0.09	-0.08	-0.12	-0.12	-0.14	-0.14	-0.17	-0.18
1.35	-0.10	-0.09	-0.12	-0.12	-0.14	-0.14	-0.18	-0.18
1.5	-0.10	-0.09	-0.14	-0.14	-0.16	-0.16	-0.18	-0.18
1.65	-0.10	-0.09	-0.14	-0.16	-0.16	-0.16	-0.18	-0.18
1.8	-0.10	-0.09	-0.16	-0.16	-0.18	-0.18	-0.21	-0.21
2.0	-0.12	-0.10	-0.16	-0.16	-0.18	-0.18	-0.21	-0.21
2.25	-0.12	-0.10	-0.18	-0.18	-0.20	-0.20	-0.21	-0.21
2.5	-0.12	-0.10	-0.18	-0.18	-0.20	-0.20	-0.24	-0.24
2.75	-0.12	-0.10	-0.21	-0.21	-0.22	-0.22	-0.24	-0.24
3.0	-0.14	-0.12	-0.21	-0.21	-0.24	-0.24	-0.24	-0.24
3.5	-0.16	-0.12	-0.24	-0.24	-0.27	-0.27	-0.30	-0.30
4.0	-0.18	-0.12	-0.24	-0.24	-0.27	-0.27	-0.30	-0.30

表 3.1-22 专用非铁金属板（带）新薄材例

材料名称	执行标准或规格	生产厂家	使用厂家
易拉罐用铝材 北铝1#带材 北铝4#带材 北铝5#带材	协议标准 0.3～0.37×400～500 0.1～0.2×80～380 0.2～0.3×80～480	北京铝箔厂	广东三水
手电筒冷轧铜带	H68，0.3×200（TM）（协议）	江西有色冶炼加工厂	江西上饶电筒厂
水箱零件冷轧铜带	H68，0.8×190，0.8×245（协议）	洛阳铜厂	北汽配件厂
超薄型弹性合金材料	3J21，3J25，$t=0.05\,(^{0.04}_{0.03})$		湖南建南机器厂

(3) 国外部分冲压板材规格

1) 日本轧制钢板。表 3.1-23～表 3.1～26 列出了日本产的轧制钢板的性能、尺寸规格及用途的部分资料数据。

2) 日本冷轧不锈钢板。表 3.1-27～表 3.1-30 列出了日本产的一些冷轧不锈钢板的性能、尺寸规格及用途的部分资料数据。

3) 日本铝及合金板。日本生产的铝及其合金板的有关性能、用途与尺寸规格参见表 3.1-31 和表 3.1-32。

表 3.1-23 钢板的力学性能和用途
（JIS G 3131，G 3141，G 3302）

种类	牌号	用途	抗拉强度 /MPa	伸长率/% t为1.0～1.6	伸长率/% t为2.5以上	适用厚度 /mm	备注
热轧钢板（JIS G 3131）	SPHC	一般用	275	27	24	1.2～14	滚桶、卷筒等
	SPHD	拉深用	275	30	35	1.2～14	汽车部件
	SPHE	深拉深用	275	31	37	1.2～6	属镇静钢
冷轧钢板（JIS G 3141）	SPCC	一般用	275	37	39	0.4～3.2	
	SPCD	拉深用	275	39	41	0.4～3.2	
	SPCE	深拉深用	275	41	43	0.4～3.2	属镇静钢
彩色镀锌钢板（JIS C 3302）	SGHC	一般用	275	—	—	1.6～6.0	用热轧原板
	SGCC	一般用	275	—	—	0.25～3.2	用冷轧原板
	SGCD	拉深用	275	37	—	0.4～2.3	用冷轧原板



表 3.1-24 软钢板的化学成分（JIS G 3131） %

牌号	P	S	C	Mn
SPHC	0.05以下	0.05以下	0.15以下	0.6以下
SPHD	0.04以下	0.04以下	0.1以下	0.5以下
SPHE	0.03以下	0.035以下	0.1以下	0.5以下

表 3.1-25 钢板的硬度（JIS G 3141）

区分	记号	硬度	
		HRB	HV
1/8硬质	8	50～71	95～130
1/4硬质	4	65～80	115～150
1/2硬质	2	74～89	135～185
硬质	1	85	170

表 3.1-26 钢板厚度的极限偏差（JIS G 3131，G 3141，G 3302） mm

厚度	热轧钢板	冷轧钢板	镀锌钢板		厚度	热轧钢板	冷轧钢板	镀锌钢板	
			SGHC	SGCC				SGHC	SGCC
<0.25	—	±0.03	—	±0.04	2.5～<3.15	±0.19	±0.15	±0.21	±0.16
0.25～<0.4	—	±0.04	—	±0.05	3.15～<4.0	±0.21	±0.17	±0.30	±0.18
0.4～<0.6	—	±0.05	—	±0.06	4.0～<5.0	±0.24	—	±0.33	—
0.6～<0.8	—	±0.06	—	±0.07	5.0～<6.0	±0.26	—	±0.33	—
0.8～<1.0	—	±0.06	—	±0.08	6.0～<8.0	±0.29	—	—	—
1.0～<1.25	—	±0.07	—	±0.09	8.0～<10.0	±0.32	—	—	—
1.25～<1.6	—	±0.09	—	±0.11	10.0～<12.5	±0.35	—	—	—
1.6～<2.0	±0.16	±0.11	±0.17	±0.12	12.5～14以下	±0.38	—	—	—
2.0～<2.5	±0.17	±0.13	±0.17	±0.14					

表 3.1-27 冷轧不锈钢板的化学成分（JIS G 4305） %

分类	牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	其他
奥氏体型	SUS201	0.15	1.0	5.5～7.5	0.06以下	0.03以下	3.5～5.5	16.0～18.0	—	0.25	—
	SUS301	0.15	1.0	2.0	0.045	0.03以下	6.0～8.0	16.0～18.0	—	—	—
	SUS304	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03以下	8.0～10.5	18.0～20.0	—	—	—
	SUS304N	0.08	1.0	2.5	0.045	0.03以下	7.0～10.5	18.0～20.0	—	0.1～0.25	—
	SUS316	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03以下	10.0～14.0	16.0～18.0	2.0～3.0	—	—
	SUS321	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03以下	9.0～13.0	17.0～19.0	—	—	Ti 5×C%以上
奥氏体、铁素体型	SUS329J₁	0.08	1.0	1.5	0.04	0.03以下	3.0～6.0	23.0～28.0	1.0～3.0	—	—
铁素体型	SUS410L	0.03	1.0	1.0	0.04	0.03以下	—	11.0～13.5	—	—	—
	SUS430	0.12	0.75	1.0	0.04	0.03以下	—	16.0～18.0	—	—	—
	SUS434	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03以下	—	16.0～18.0	0.75～1.25	—	—
马氏体型	SUS403	0.15	0.50	1.0	0.04	0.03以下	—	11.5～13.0	—	—	—
	SUS410	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03以下	—	11.5～13.5	—	—	—
	SUS420J₂	0.26～0.40	1.0	1.0	0.04	0.03以下	—	12.0～14.0	—	—	—
沉淀硬化型	SUS631	0.09	1.0	1.0	0.04	0.03以下	6.5～7.75	16.0～18.0	—	—	Al 0.75～1.50

表 3.1-28 主要冷轧不锈锈板的力学性能、特征和用途（JIS G 4305）

牌号	屈服点 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	硬 度			磁性	特征和用途
				HRB	HV			
SUS304	210	530	40	90	200以下		无	1）18-8系不锈钢，冷加工性、耐蚀性、耐热性良好 2）家庭用品，食品工业，机械，汽车零件，暖气设备



牌号	屈服点 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	硬度			磁性	特征和用途
				HRB	HV			
SUS430	210	460	22	88	200		有	1）Cr系不锈钢，冷加工性、耐蚀性良好 2）家庭用品，电气、煤气机器，石油器具零件
SUS420J$_2$	230	550	18	99	247	退火后 40HRC	有	1）强磁性体，退火后具有很高硬度 2）机械零件
SUS631S	390	1 050	20			200HV	无	1）热处理后可成为强韧性材料 2）弹簧、耐磨损机械零件
SUS631TH1050	980	1 160	3			40HRC 345HV	无	

表 3.1-29　弹簧用不锈钢带的力学性能（JIS G 4313）

分类	牌号	硬度 HV（冷轧后）	抗拉强度 σ_b/MPa	热处理后硬度 HV	厚度/mm
奥氏体型	SUS301－CSP－H	490 以上	1 350	—	0.1，0.12，0.15，0.2
	SUS304－CSP－H	370	1 150	—	0.25，0.28，0.3，0.35
马氏体型	SUS420J$_2$－CSP－O	210	—	410～570	0.4，0.45，0.5，0.55
沉淀硬化型	SUS631－CSP－H	450	1 450	530	0.6，0.7，0.8，0.9，1.0，1.1

表 3.1-30　不锈钢板板厚的板限偏差（JIS G 4305）　mm

板　厚	厚度极限偏差	板　厚	厚度极限偏差	板　厚	厚度极限偏差
0.3　0.4　0.5	±0.05	1.0　1.2	±0.10	2.5　3.0	±0.22
0.6　0.7	±0.07	1.5	±0.12		
0.8　0.9	±0.09	2.0	±0.17		

表 3.1-31　铝及其合金板的化学成分、特征与用途（JIS H 4000）

分类	牌号	化学成分（质量分数）/%									质别	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	特征和用途
		Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al				
纯铝 A199%以上	A1050	0.05 以下	0.25 以下	0.4 以下	0.05 以下	0.05 以下	0.05 以下	—	0.03 以下	99.5 以上	O H12	100 120	25 6	1）电导率、热导率、光反射率高，耐蚀性良好 2）反射板，热交换器，照明器具，装饰品
	A1080	0.03	0.15	0.16	0.02	0.02	0.03	—	0.03	99.8 以上	O H12	95 110	30 6	
	A1100	0.05～0.2	Si＋Fe 1.0 以下		0.05	—	0.1 以下	—	—	99.0	O H12	110 130	25 6	1）深拉深加工用，加工性、耐蚀性良好 2）家庭用各种容器，电器具零件，箔
	A1200	0.05 以下	Si＋Fe 1.0 以下		0.05	—	0.1 以下	—	—	残	O H12	110 120	25 6	
Al－Cu 系合金	A2017	3.5～4.5	0.8 以下	0.7 以下	0.4～1.0	0.2～0.8	0.25 以下	0.1 以下	—	—	O T4	220 360	12 15	1）高强度铝合金中的一种；其强度高，但耐蚀性差 2）航空机械、输送机器零件
Al－Mn	A3003	0.05～0.2	0.6 以下	0.7 以下	1.0～1.5	—	0.1 以下	—	—	—	O H12	130 120	23 5	1）成形性、焊接性、耐蚀性良好 2）饮料罐，深拉深制品，电灯灯头，建筑用材
	A3004	0.25 以下	0.3 以下	0.7 以下	1.0～1.5	0.8～1.3	0.25 以下	—	—	—	O H12	200 250	16 4	
Al－Mg 系合金	A5005	0.2 以下	0.4 以下	0.7 以下	0.2 以下	0.5～1.1	0.25 以下	0.1 以下	—	—	O H12	110 120	20 6	1）拉深性、耐蚀性良好，阳极酸化处理良好 2）一般调理器具



续表 3.1-31

分类	牌号	化学成分（质量分数）/%									质别	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	特征和用途
		Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al				
Al－Mg系合金	A5052	0.1	Si + Fe 0.45 以下		0.1 以下	2.2 ~2.8	0.1	0.15 0.35	—	—	O H12	180 220	18 5	1）成形性，耐蚀性，焊接性良好 2）用途广泛，家电机器，OA 机器零件，容器等
	A5083	0.1	0.4 以下	0.4 以下	0.3 ~1.0	4.0 ~4.9	0.25 以下	0.05 0.25	0.15 以下	—	O H22	280 320	16 8	1）耐蚀性、焊接性良好，耐海水侵蚀性优 2）压力容器，低温容器
Al－Mg－Si	A6061	0.15 ~0.4	0.4 ~0.8	0.7 以下	0.15 以下	0.8 ~12	0.25 以下	0.04 0.35	0.15 以下	—	O T4	150 210	18 11	1）耐蚀性、焊接性良好 2）汽车车身，机械零件及结构件
Al－Zn	A7075	1.2 ~2.0	0.4 以下	0.4 以下	0.3	2.1 ~2.9	5.1 ~6.1	0.18 0.35	0.2	—	O T651	280 550	10 9	1）在铝合金中强度最高 2）航空机械及汽车用材

表 3.1-32　铝及铝合金板与带的厚度的板限偏差（JIS H 4000）　mm

宽度 / 厚度	板		带		宽度 / 厚度	板		带	
	390	390～690	190 以下	190～290		390	390～690	190 以下	190～290
0.1～0.15	±0.02	—	±0.01	±0.02	0.5～0.8	±0.06	±0.07	±0.04	±0.05
0.15～0.25	±0.03	±0.04	±0.02	±0.03	0.8～1.2	±0.06	±0.09	±0.05	±0.06
0.25～0.35	±0.04	±0.05	±0.02	±0.03	1.2～2	±0.07	±0.11	±0.06	±0.07
0.35～0.50	±0.05	±0.07	±0.03	±0.04	2～3.2	±0.09	±0.14	±0.07	±0.08

4）日本铜及其合金板。日本生产的铜及其合金板的有关性能、用途与尺寸规格参见**表** 3.1-33～表 3.1-35。

表 3.1-33　铜及铜合金的化学成分、力学性能和用途（JIS H 3100，H 3110，H 3130）

分类	牌号	化学成分（质量分数）/%								质别	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	特征和用途
		Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	Ni	Mn	P				
铜	C－1100	99.9 以上	—	—	—	—	—	—	—	O $\frac{1}{2}$H	200 250～320	35 以上 15	1）导电性、导热性、延展性、拉深弯曲加工性、耐蚀性、耐候性良好 2）电气器具零件，端子类
红铜	C－2200	89.0 ～91.0	0.05 以下	0.05 以下	—	残	—	—	—	$\frac{1}{2}$H	260～340	25	1）外观光亮，延展性、拉深加工性、耐蚀性良好 2）化妆品盒、盖
黄铜	C－2600	68.5 ～71.5	0.05 以下	0.05 以下	—	残	—	—	—	O $\frac{1}{2}$H	280 350～450	50 以上 28	1）延展性、拉深加工性良好 2）拉深件、抛物天线、暖气部件
	C－2680	64.0 ～68.0	0.07	0.05 以下	—	残	—	—	—	O $\frac{1}{2}$H	280 360～450	50 28	复杂形状拉深件、按钮类
易切削黄铜	C－3560	61.0 ～64.0	2.0 ～ 3.0	0.1 以下	—	残	—	—	—	$\frac{1}{2}$H	380～470	10	1）冲裁性良好 2）钟表零件、齿轮
加锡黄铜	C－4250	87.0 ～90.0	0.05 以下	0.05 以下	1.5 ～3.0	残	—	—	—	O $\frac{1}{2}$H	300 400～490	35 15	1）耐应力、耐腐蚀性、耐磨性、弹性好 2）开关、继电器、接插件、各种弹簧
磷青铜	C－5111	Cu + Sn + P 99.5 以上	—	—	3.5 ～4.5	—	—	—	0.03 ～ 0.35	O $\frac{1}{2}$H	300 420～520	38 12	1）延展性、耐疲劳性、耐蚀性好 2）电子与电气产品用，如弹簧、开关、继电器、隔离板、真空管、引线架
	C－5212	Cu + Sn + P 99.5 以上	—	—	7.0 ～9.0	—	—	—	0.03 ～ 0.35	$\frac{1}{2}$H	500～620 600～720	30 8	



续表 3.1-33

分类	牌号	化学成分（质量分数）/% Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	Ni	Mn	P	质别	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	特征和用途
白铜	C-7060	Cu+Ni+Fe+Mn 99.5以上	0.05以下	1.0~1.8	—	0.5	9.0~11.0	0.2~1.0	—	F	280	30	1）耐蚀性尤其耐海水性良好，质硬 2）热交换器零件
白铜	C-7150	Cu+Ni+Fe+Mn99.5	0.05以下	0.4~1.0	—	0.05	29.0~33.0	0.2~1.0	—	F	350	35	1）耐蚀性尤其耐海水性良好，质硬 2）热交换器零件
锌白铜	C-7351	70.0~75.0	0.1以下	0.25以下	—	残	16.5~19.5	0~0.5	—	O $\frac{1}{2}$H	330 400~520	20 5	1）外观光亮，延展性、耐疲劳性、耐蚀性良好 2）餐具、装饰件、半导体晶体管盒、盖
锌白铜	C-7451	59.0~65.0	0.1以下	0.25以下	—	残	12.5~15.5	0~0.5	—	O $\frac{1}{2}$H	330 400~520	20 5	
弹簧用 铍青铜	C-1720	Cu+Be+Ni+Co+Fe 99.5	—	—	—	—	—	—	(Be) 1.8~2.0	O $\frac{1}{2}$H	420~550 600~710	35 5	1）SH级用于不弯曲的弹簧 2）高性能的弹簧、连接器、插座
弹簧用 磷青铜	C-5210	Cu+Sn+P 99.7	0.05以下	0.1以下	7.0~9.0	0.2以下	—	—	—	H SH	600~720 750~850	20 9	
弹簧用 锌白铜	C-7701	54.0~58.0	0.1	0.25	—	残	16.5~19.5	0~0.5	—	H SH	640~750 780~880	— —	1）外观光亮，延展性、耐疲劳性、耐蚀性良好 2）弹簧

表 3.1-34　磷青铜、锌白铜板、带厚度的极限偏差（JIS H 3110） mm

厚度 \ 宽度	厚度极限偏差 190以下	190~390	390~650
0.05~0.12	±0.010		
0.12~0.2	±0.015		
0.2~0.3	±0.020		
0.3~0.4	±0.025	±0.040	
0.4~0.5	±0.030	±0.045	±0.05
0.5~0.6	±0.035	±0.05	±0.06
0.6~0.8	±0.040	±0.06	±0.07
0.8~1.2	±0.045	±0.07	±0.08
1.2~1.5	±0.05	±0.08	±0.10
1.5~2.0	±0.06	±0.09	±0.12

表 3.1-35　弹簧用铜合金板、带厚度的极限偏差（JIS H 3130） mm

厚度 \ 宽度	厚度的极限偏差 200以下
0.05~0.08	±0.005
0.08~0.16	±0.010
0.16~0.26	±0.015
0.26~0.40	±0.020
0.40~0.55	±0.025
0.55~0.7	±0.030
0.7~0.9	±0.035
0.9~1.2	±0.040
1.2~1.5	±0.045
1.5~1.8	±0.050
1.8~2	±0.055

5）瑞典钢板。表 3.1-36 列出了一种瑞典阀片钢的性能数据。

表 3.1-36　瑞典阀片钢（WHB20）化学成分、力学性能

化学成分/% C	Si	Mn	P	S
0.97~1.07	0.18~0.30	0.28~0.52	<0.030	<0.025

力学性能 料厚/mm	σ_b/MPa	δ/%	HV
0.152	2 050±60	4以上	593±25
0.203	2 000±60	4以上	580±25
0.254	1 950±60	4以上	565±25
0.305	1 900±60	4以上	553±25
0.381	1 850±60	4以上	540±25
0.457	1 850±60	4以上	540±25
0.508	1 800±60	4以上	525±25

注：资料来源：西安远东机械公司

6）韩国钢板。表3.1-37列出了一种韩国钢板的性能数据。

表3.1-37 韩国产一种SPCC－SD的力学性能

料厚/mm	力学性能			
	σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ/%	HRB
0.23	250～280	360～380	37～39	52～55

注：资料来源：南昌搪瓷厂。

2.2 板料的冲压性能

（1）板料冲压性能概述

1）板料冲压性能的涵义与构成

① 板料冲压性能的涵义。板料冲压性能是指板料对各种冲压加工方法的适应能力。它包括加工的简便程度，工件的质量、精度、强度、刚度，极限变形程度、冻结性、贴模性，模具寿命及加工能量消耗等。显然，这些指标好，表明板料的冲压性能高。

冲压成形，由于各类基本加工工序的变形机理不同，所以，其冲压成形性能的具体涵义、构成与要求也不同。

材料冲压成形性能之间的关系存在各种情况：有的相互一致，呈正相关关系；有的相互之间互为制约，表现出某种负相关关系；有的相互之间互不影响，表现为不相关关系。因此，不能期望板材的冲压性能高，则各种评价的指标同时都为最佳值。

② 板料冲压性能的构成。由于两大类工艺方法的目的要求与变形机理有根本性的不同，因此，板料冲压性能的构成可以由相对应的两类的性能构成，即

板料冲压分离性能

板料冲压成形性能

2）板料冲压分离性能。板料冲压分离性能是指板料对冲压分离加工的适应能力。它主要包括加工的简便程度，工件的质量（特别是工件断面质量）、精度、刚度与模具的寿命等。

冲压分离工序按其变形机理可分为4类：冲裁、精冲、半精冲和整修。据此，板料冲压分离性能也可以有相应的涵义和内容构成。

① 冲裁性能。板料冲裁性能的具体体现主要是：

a）剪切面好。要求冲裁件断面之剪切面部分的比例较大（适中冲裁间隙条件下，其剪切面可占断面的1/3～1/2），而塌角、断裂面及毛刺部分所占的比例较小。

b）精度高。希望冲裁零件的尺寸、形状与所要求的精度偏差小，其弯拱与斜度也较小。

c）模具寿命长。也就是模具工作部分被粘结、被磨损的程度少。

反映板料冲裁性能的一些材料特征值有：

屈服极限	σ_s
强度极限	σ_b
屈强比	σ_s/σ_b
硬度	常用HV和HB
延伸率	δ
断面收缩率	ψ
加工硬化指数	n
各向异性系数	r

一般而言，板材的延伸率δ愈高，断面收缩率ψ愈小，冲裁件断面之剪切面比例愈大。

断面塌角部分的大小，与材料延伸率δ和加工硬化指数n有一定的正相关关系。δ和n值愈大，则塌角愈大。

冲裁件的尺寸精度受材料的强度、硬度的影响较大。比如，材料较硬、屈服极限较高，则落料件的弹复值ΔD（ΔD＝工件外径－凹模内径）较大；且这个弹复值与板平面的方向性有关，平行、垂直板材纤维方向的ΔD存在明显差异。

冲裁件的弯拱及断面斜度与板材的屈强比σ_s/σ_b和加工硬化指数n值相关。n值愈大，其弯拱程度愈大。

影响冲裁模寿命的材料特征值很多，其中最主要的是材料的硬度、强度和延伸率等。材料的强度愈高、硬度愈硬，模具的磨损愈厉害。从细观角度分析其原因还有两个：一是在冲裁过程的下行程与上行程里，模具分别受到压应力与拉应力的交变应力作用；二是材料在冲裁变形过程中产生了加工硬化，且使得工件断面本身具有了不同的硬度分布，如图3.1-1所示，与剪切面与断裂面交界处硬度最大。这表明，即便在冲裁变形的下行程里，模具经受的是一种变硬度材料的外力作用。从而，造成了模具在连续冲裁工作期间受到更加严重的交变应力作用，导致出现疲劳破坏的可能。

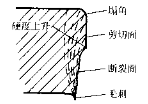


图3.1-1 冲裁件断面硬度变化

② 整修性能。由于整修是对冲裁件的断面部分进行第二次加工的冲压分离工序，所以，板料整修性能应具体体现在以下三个方面：

a）剪切面。整修件的整个断面为切削面，为光滑平整的断面，其表面粗糙度可达R_a0.4～0.8 μm（外缘整修）、R_a0.2～0.4（内缘整修）。

b）尺寸精度。整修零件的尺寸精度可达IT6～7级、内缘整修可达IT5～6级。

c）模具寿命。整修加工中因有切屑生成，故整修模很容易被切屑粘结，并加重了其磨损的程度，使得整修模的寿命要比冲裁模的寿命短。

由于整修零件是先冲裁，然后整修，而整修变形机理是切削机理，因此，反映整修性能的材料特征值应该主要是考虑影响材料的可切削加工性的那些值。比如，材料的韧性、延伸率愈低，则整修件断面的光洁程度愈高，模具的粘结程度愈小；材料的组织愈致密、晶粒愈细化，则其断面愈光洁、尺寸精度愈好。

③ 精冲性能。精冲性能的具体体现方面与冲裁相同，但具体要求更高，例如：

a）剪切面。精冲件的断面是一种塑性分离面，当然也有毛刺。其断面（剪切面）质量包括表面粗糙度、表面完好率和允许的撕裂等级三项内容。精冲件断面粗糙度一般为R_a2.5～0.63 μm，表面完好率一般可达Ⅰ～Ⅲ级（规定有Ⅰ～Ⅴ级），允许的撕裂为1～4级。

b）尺寸精度。精冲件的尺寸精度一致性好，其偏差在0.01 mm之内。当料厚$t\leqslant1$ mm时，其尺寸精度可达IT6级；$t\leqslant3$ mm时，可达IT7级；$t\leqslant8$ mm时，可达IT8级。

c）模具寿命。精冲模的寿命比普通冲裁模的寿命短很多。影响精冲模寿命的因素很多，其中材料的强度和硬度的影响较为明显。比如，精冲15号低碳钢及精冲45号中碳钢，有前者模具寿命要长一倍的结果。

反映板料精冲性能的材料特征值，除有那些与反映冲裁性能的材料特征值相同的（即有σ_s、σ_b、δ、ψ、HV和HB、n及r）以外，还有一个材料的金属结晶组织——渗碳体及碳化物（球化）变形程度。所以，在对钢板材料进行精冲之

前，一般均需对材料作球化退火处理，用以得到球化完全，弥散良好、分布均匀的细球状碳化物组织，从而使其精冲性能提高。

表3.1-38～表3.1-40分别列出了各种钢板、铜及其合金板、铝及其合金板的牌号与精冲适应性的等级。

表 3.1-38　各种钢材的精冲适应性

材料	可精冲的大约最大厚度/mm	精冲适应性①
08	15	1
10	15	1
15	12	1
20	10	1
25	10	1
30	10	1
35	8	2
40	7	2
45	7	2
50	6	2
55	6	2
60	4	2
70	3	3
T8A	3	3
T10A	3	3
15Mn	8	2
16Mn	8	2
15CrMn	5	2
20MnMoB	8	2
20CrMo	4	2
GCr15	6	3
1Cr18Ni9	8	2
0Cr13	6	2
1Cr13	5	2
4Cr13	4	2

① 1为良好：理想的精冲材料，断面粗糙度低，模具寿命长；
2为中等：适宜的精冲材料，断面粗糙度低，模具寿命正常；
3为尚可：勉强的精冲材料，断面撕裂较大，模具寿命短。

表 3.1-39　铜及其合金的精冲适应性

材　料	精冲适应性①
T2、T3、T4、TU1、TU2	1
H98、H90、H80、H70、H68	1
H62	2
HSn70－1、HSn62－1	2
HNi65－5	2
QSn4－3	2
QBe2，QBe1.7	3
QA17	2

① 同表3.1-38注①。

表 3.1-40　铝及其合金的精冲适应性

材　料	精冲适应性①
1070A、1060、1050A、1035、1200、8A06	1
3A21	1
5A02、5A03	2
2A11、2A12	3

① 同表3.1-38注①。

④ 半精冲性能。半精冲分离加工的各个基本工序，其变形机理各有不同：有的是冲裁机理的复合（例如上、下冲裁），有的是冲裁与整修的复合（如光洁冲裁的两种），有的是精冲与整修的复合（如对向凹模冲裁、挤压式冲裁），有的是冲裁与胀形拉伸产生细颈的断裂分离机理的复合机理（如胀拉冲裁）。因而，讨论板料的半精冲性能，应该视具体的工序并根据这种提示，去作与此相对应的考虑，选择相对应的材料特征值，以达到提高其半精冲性能的目的。

3）板料冲压成形性能。板料冲压成形性能是指板料对冲压成形加工的适应能力。它包括的内容比分离性能的更多、更系统些。

① 板料冲压成形性能的分类。板料的冲压成形性可分为：

贴模性能（Fitting Behaviour）；

成形性能（Formability）；

冻结性能（Shape Fixability）。

这些性能的总体，构成所谓综合的冲压成形性能，或者叫做广义的冲压成形性能，如图3.1-2所示。当然，不破裂是基本前提。迄今为止，对于综合性能中的成形性能（抗破裂性能）的研究取得了不少更有系统性的成果。

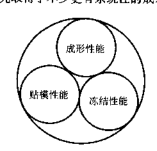


图 3.1-2　综合成形性能的构成

通常，把材料开始出现破裂时的根限变形程度作为板料冲压成形性能的判定尺度，并用这种尺度的各种物理量作为评定冲压成形性能的材料特性（评定参数或性能指标）。这可视为狭义的冲压成形性能。

即便是狭义的冲压成形性能，也要依据冲压成形工序的不同分类来进行研究。只有针对冲压成形中各种工序的基本变形特点和具有相同应力应变特点的同一类冲压成形，应用个别的成共同的分析方法与措施，才能解决板料冲压性能问题。

表3.1-41归纳了冲压成形性能的基本分类情况。这一分类方法把冲压成形性能分为拉深性能、翻边性能、胀形性能与弯曲性能4种；而对其判定尺度—破裂极限是根据材料所受到的拉应力或伸长变形超过材料相应允许值而分为α破裂、β破裂及弯曲破裂的。

表 3.1-41　冲压成形性能的分类（1）

变形 / 极限因素①	法兰边压缩变形	法兰边拉伸变形	弯曲变形
α破裂	拉深性能	胀形性能	



续表 3.1-41

变形 / 极限因素[①]	法兰边压缩变形	法兰边拉伸变形	弯曲变形
β破裂		翻边性能	
弯曲破裂			弯曲性能

① α破裂——由于板料所受拉应力超过材料强度极限（即 $\sigma_{拉} > \sigma_b$）时引起的破裂；

β破裂——由于板料的伸长变形超过材料局部允许的延伸率（即 $\delta > \delta_p$）时引起的破裂；

弯曲破裂——由于弯曲变形区外层材料的拉应力过大（即 $\sigma_\theta > \sigma_{\theta_p}$）时引起的破裂。

根据把冲压成形基本工序依其变形区的应力应变特点分为拉伸类、压缩类及复合类三个基本类别理论，可以把冲压成形的分类与冲压成形性能的分类建立如表 3.1-42 所示的对应关系。这一分类方法把冲压成形性能分为拉伸类成形性能、压缩类成形性能和复合类成形性能 3 种；其对成形极限的判定不是仅仅对单个基本工序而言的，有一定程度的综合性与系统性。

表 3.1-42　冲压成形性能的分类（2）

冲压成形类别	成形性能类别	提高极限变形程度的措施
拉伸类冲压成形（翻边、胀形等）	拉伸类成形性能（翻边性能、胀形性能等）	1）提高材料的塑性 2）减少变形不均匀程度 3）消除变形区局部硬化层和应力集中
压缩类冲压成形（拉深、缩口等）	压缩类成形性能（拉深性能、缩口性能等）	1）降低变形区的变形抗力，摩擦阻力 2）防止变形区的压缩失稳（起皱） 3）提高传力区的承载能力
复合类冲压成形（弯曲、曲面零件拉深成形等）	复合类成形性能（弯曲性能、拉深胀形性能等）	根据所述成形类别的主次，分别采取相应措施

② 板料冲压性能试验及材料特性值。板料冲压性能试验方法通常分为三种类型：力学试验、金属学试验（统称间接试验）和工艺试验（直接试验）。各种试验方法及得到的材料特性值如下：

a）力学试验。简单拉伸试验：得到的试验值有屈服点 σ_s、抗拉强度 σ_b、屈强比 σ_s/σ_b、屈服伸长率 δ_s、均匀伸长率 δ_u、总伸长率 δ、均匀宽度应变 u、断口宽度应变 ϕ、极限变形能力 $\bar{\varepsilon}_f(\varepsilon_x、\varepsilon_y、\varepsilon_t)$、硬化指数 n 与各向异性系数 r 及 Δr 等。

简单拉伸试验获得的材料特征值对冲压成形缺陷的一般影响规律见表 3.1-43。

表 3.1-43　材料特征值对冲压成形缺陷的影响

成形不良现象		材料特征值							板厚
		屈服点 σ_s	抗拉强度 σ_b	伸长率 δ_u	n 值	r 值	弹性模量 E	极限变形能	
破断	α破断（拉深）			○	○	⊙			○
	α破断（胀形）	△	△	⊙	⊙	○			○
	β破断（翻边）	△	△	○	⊙	○		⊙	○
	弯曲破断		△	⊙	○			⊙	⊙
面形状	起皱（法兰边）	⊙	△		△	○			○
	起皱（壁部）	⊙	△		○	○	△		○
	面歪扭畸变	⊙	○		○	△	○		○
	其他的形状不良（线偏移、放射状、平面内凹等）	○	○		○		△		○
尺寸精度	角度变化	⊙	△		○		△		○
	壁部翘曲	⊙	△		○		△		○
	扭曲	⊙	△		○		△		○
	棱线翘曲	⊙	△		○		△		○
	形状冻结不良	⊙	△		○	△	△		○

注：影响度：大⊙—○—△小

双向拉伸试验：得到的试验值有硬化指数 n_p 值、延性 T 值及各向异性系数 X 值等。

b）金属学试验。金属学试验用以确定金属材料的硬度、表面粗糙度、化学成分、结晶方位分晶粒度等。

c）工艺试验。工艺试验也称模拟试验。它是用模拟生产实际中的某种冲压成形工艺的方法测量出相应的工艺参数。例如 Swift 的拉深试验测出极限拉深比 LDR、TZP 试验测出对比拉深力的 T 值、Erichsen 试验测出极限胀形深度 E_r 值、K·W·I扩孔试验测出极限扩孔率 λ 及福井伸二的球底锥形件拉深试验测出 CCV 值等。

③ 冲压成形极限的现代评价方法。对冲压成形极限即狭义的冲压成形性能的评价，新近已形成了如下一系列的方法。

a）数值模拟。

b）实物实验。

c）模拟实验。其模拟实验的模型分：

简易模型（对实际形状进行简化）；

复制模型（对部分实形进行复制）；

相似模型（对几何尺寸给以缩小）。

④ 小型成形性试验（杯形类零件成形试验）。

⑤ 材料试验。这些方法可以分为计算方法与实验方法两大类。而其中的实验方法，也可分为模拟接近实际成形状态或者具有相应特征的直接试验方法、和从所求得反映材料基本性质的特征值去推断其成形极限的间接试验方法两类。

（2）板材拉伸试验

板材的拉伸试验也叫做单向拉伸试验或简单拉伸试验。应用拉伸试验方法，可以得到许多评定板材冲压性能的试验值，所以，在工程实际中应用十分普遍。

由于试验目的不同，板材冲压性能评价用的拉伸试验方法和所得到的试验值均与材料力学中仅为评定材料强度性能的拉伸试验有所不同。

板材冲压性能拉伸试验方法如下。

试验设备：拉力试验机（机械式或液压式）。电子拉力试验机及多功能快速自动测试装置。

试件形状与尺寸：从待试验的板材上截取并加工成如图 3.1-3 所示的试样。

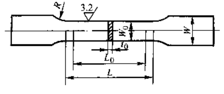


图 3.1-3 拉伸试验试样

拉伸试样的长度按标准（如 GB/T 228—1987）确定。

试样的宽度，根据原材料的厚度采用 10、15、20 和 30 mm 四种，宽度尺寸偏差不宜大于 0.02 mm

应当指出，拉伸试样的尺寸和尺寸精度对所得的试验结果（拉伸试验值）具有不可忽视的影响。由于现在用做评价板材冲压性能的拉伸试验试样尺寸的标准还不十分完善，在这项工作中应予以充分的注意。

在拉伸试验时，利用测量装置测量拉伸力 P 与拉伸行程（试样伸长值）ΔL，根据这些数值可以在 P 与 ΔL 坐标系中得到拉伸力 P 随伸长值而变化的曲线 P—ΔL 曲线，称之为拉伸曲线（图 3.1-4）。

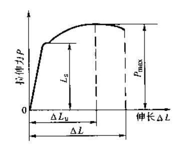


图 3.1-4 拉伸曲线

如果用拉伸试样的原始断面积 F_0 去除拉伸力 P，即可得到拉伸过程中的名义应力 σ。同时，把试样伸长值 ΔL 换算成相对伸长率 $\delta = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0}$，即可在 σ 与 δ 的坐标系里得到名义应力与相对伸长率表示的拉伸曲线（图 3.1-5）。

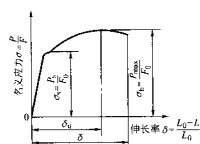


图 3.1-5 名义应力拉伸曲线

利用板材的单向拉伸试验可以得到与板材冲压性能密切相关的试验值。这里，仅对其中较为重要的拉伸试验值，分别叙述如下（其试验方法应执行 GB/T 15825.1—1995 及 GB/T 15825.2—1995 相关规定）。

1）屈服点 $\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$。如果板料拉伸曲线不具有明显的屈服点（屈服平台），可以取残余应变 0.002 时的名义应力。屈服极限 σ_s 一般与拉伸类成形性能成反比关系，且 σ_s 愈低其成形形状稳定性愈高。

2）抗拉强度 $\sigma_b = \frac{P_{max}}{F_0}$。在拉伸过程中，当拉伸力达到最大值 P_{max} 时，试样的拉伸变形由均匀变形阶段进入局部变形阶段，称这种状态为塑性拉伸失稳。在塑性拉伸失稳时，出现缩颈。抗拉强度 σ_b 较高者其冲压成形性能较高，但冲压成形力更大。

3）屈强比 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$。一般情况下，可以认为，当屈强比较小时，板材的屈服点低，进行冲压变形的范围较大，而且在曲面零件冲压成形时，容易获得较大的拉应力，使成形的形状得以稳定（冻结），也就是减小回弹和消除松弛。屈强比 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 除了影响拉深（成形）弹复外，还与拉伸类成形极限成负相关关系。

4）均匀伸长率 $\delta_u = \frac{\Delta L_u}{L_0}$。均匀伸长率较大时，板材具有较大的塑性变形稳定性，不易产生局部的过大变形而导致破裂。因此，板材的均匀伸长率大，对拉伸类成形有利，在一定条件下能成正相关关系。总延伸率也有这种关系。

在拉伸试验中，试样的伸长变形达到均匀伸长率时，也即为出现缩颈，拉伸力达到最大值 P_{max} 时。

5）硬化指数 n（亦称 n 值）。大多数金属板材的硬化规律接近于幂函数 $\sigma = K\varepsilon^n$ 的关系（图 3.1-6），所以可用指数 n 表示其硬化性能。

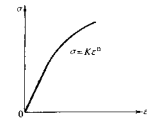


图 3.1-6 硬化曲线

n 值大的板材，在冲压成形时加工硬化剧烈，也就是说，变形抗力增加较快。因此，如果板材的 n 值大，它在冲压变形中变形区内各部分的变形程度趋于均匀，致使总体变形程度增大，对拉伸类冲压成形有利，成为其一个重要的评定参数。当然，n 值对压缩类冲压成形也有影响，对抗皱折性有利。

利用拉伸试验确定 n 值的方法很多，但已形成国标 GB/T 5028—1999。如果测量并计算出拉伸过程中某两点的真实应力 σ 与应变 ε，则可利用公式 $\sigma = K\varepsilon^n$，计算出 n 与 K 的数值。工程上称这种方法为两点法。两点法的取值点对所得结果有直接影响。当然，取值点必须是在均匀变形范围内，因此，通常取为 $\delta_1 = 0.05$ 和 $\delta_2 = \delta_u$。有直接利用两个取值点的 P 和 L 值来计算 n 值的公式，即如下的对数公式，所用试件为普通拉伸试件（参见图 3.1-3）。

$$n = \lg\frac{P_2 L_2}{P_1 L_1} / \lg\frac{\ln(L_2/L_0)}{\ln(L_1/L_0)}$$

式中，P_2、L_2 为最大载荷及拉断后试件的长度；P_1、L_1 为变形量为 10% 时的载荷值及试件的长度；L_0 为原始长度（试件标距）。

除采用两点法计算 n 值外，还有考虑均匀变形阶段以后塑性变形的三点法等。

鉴于两点法、三点法试验可能的分散性和随机性，目前 n 值一般采用多点回归的方法求得。

考虑到板材的方向性，一般按板材纤维的三个方向（顺着纤维方向为 0°、垂直纤维方向为 90°、与纤维成 45°方向）制取试件，进行拉伸；最后，用此三个方向的 n 值再取平均值，即按下式计算其平均值。



$$n = \frac{1}{4}\ (n_0 + 2n_{45} + n_{90})$$

此外，还有用阶梯形拉伸试样的拉伸来计算 n 值的公式等。其中的阶梯形试件（国际深拉深协会 IDDRG 标准）如图 3.1-7 所示，进行拉伸，待试件在宽度为 W_0 处破断后，测出 W_1、W_2 处的应变 ε_1、ε_2，再按下式进行计算得到 n 值。

$$n = \frac{L_n(W_1/W_2) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{L_n(\varepsilon_2/\varepsilon_1)}$$

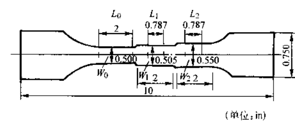


图 3.1-7　阶梯形试件

6）各向异性系数。板厚方向性系数定义为 $r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}}$，是拉伸过程中板材试样的宽度应变 ε_b 与厚度应变 ε_t 的比值。r 值大时，表明板材在厚度方向上的变形比较困难，比板平面方向上的变形小，在伸长类成形中，板材的变薄量小，有利于这类冲压成形。但实验与理论分析都证明，当板料的 r 值较大时，抗皱折性好，它的拉深性能也好，板材的极限拉深系数 m_c 更小，成为压缩类冲压成形的一个重要评定参数。

由于板材的 r 值常具有方向性，也就是说，在板平面不同方向上的 r 值常不一样。这时可以按平均值计算：

$$\bar{r} = \frac{1}{4}\ (r_0 + 2r_{45} + r_{90})$$

式中，r_0、r_{45} 与 r_{90} 分别是与板材轧制方向成 0°、45°与 90°的方向上截取的拉伸试样时测得的 r 值。

一般认为，r 值在拉伸过程中不发生变化，故可在伸长率为 10%～20%之间测量计算。

板平面方向性系数定义为 $\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}$，即板厚方向性系数在板平面不同方向的差异。板平面方向性系数 Δr 大时，板材的方向性强，结果会引起塑性变形分布的不均，造成圆筒形拉深件的厚度不均和凸耳现象严重等。因此，Δr 过大，对冲压成形不利。

应当注意，不少冲压板材的厚向异性系数 r 愈大，其板平面方向性系数 Δr 的绝对值也愈大。r 愈大时，其极限拉深系数 m_c 愈小；但 Δr 愈大时，拉深凸耳愈严重。因此，在选择材料的 r 值时，需考虑它对拉深成形具有有利影响和不利影响的两个方面。

另外，r 值与拉伸类成形性能也有关系，也是其评定参数之一。

表 3.1-44 和表 3.1-45 分别列出了部分材料的 n 值和 r 值。

（3）各种工艺试验方法

工艺试验也称模拟试验或直接试验。在工艺试验时，试件所受到的应力状态和所产生的变形都与真实的冲压加工工艺相同，所以，利用工艺试验不仅可以评定板材的冲压性能，而且可以得到某些冲压工艺参数，供制订冲压工艺应用。

表 3.1-44　部分板材的 n 值和 K 值

材料	n 值	K/MPa	材料	n 值	K/MPa
08F	0.185	708.76	T2	0.455	538.37
08AL（ZF）	0.252	553.47	H62	0.513	773.38
08AL（HF）	0.247	521.27	H68	0.435	759.12
08AL（Z）	0.233	507.73	QSn6.5－0.1	0.492	864.49
08AL（P）	0.25	613.13	Q235	0.236	630.27
10	0.215	583.84	SPCC	0.212	569.76
20	0.166	709.06	SPCD	0.249	497.63
5A02	0.164	165.64	1Cr18Ni9Ti	0.347	1 093.61
2A12O	0.192	366.29	L4M	0.286	112.43

表 3.1-45　一些板材的 r 值

材　料	r_0	r_{45}	r_{90}	r	Δr
沸腾钢	1.23	0.91	1.58	1.16	0.51
脱碳沸腾钢	1.88	1.63	2.52	1.92	0.57
钛镇静钢	1.85	1.92	2.61	2.08	0.31
铝镇静钢	1.68	1.19	1.90	1.49	0.60
钛	4.00	5.49	7.05	5.51	—
铜　O材	0.90	0.94	0.77	0.89	－0.10
铜　$\frac{1}{2}$H材	0.76	0.78	0.90	0.85	－0.04
铝　O材	0.62	1.58	0.52	1.08	－1.01
铝　$\frac{1}{2}$H材	0.41	1.12	0.81	0.87	－0.51
不锈钢	1.02	1.19	0.98	1.10	－0.19
黄铜　2种O材	0.94	1.12	1.01	1.05	－0.14
黄铜　3种$\frac{1}{4}$H材	0.94	1.00	1.00	0.99	－0.03

常用的工艺试验方法如下。

1）拉深性能试验。这是为确定板材拉深性能而进行的一种工艺试验。相应的试验标准为 GB/T 15825.3—1995。

① 确定最大拉深程度法。此方法即为 Swift 求极限拉深比的实验，也叫 Swift 拉深实验。其实验装置如图 3.1-8 所示。实验方法是用不同直径的圆形坯料，在图示的装置中进行拉深成形，取试件侧壁不致破裂时可能拉深成功的最大坯料直径 D_{0max} 与冲头直径 d_p 之比值，称为极限拉深比（LDR），即

$$\mathrm{LDR} = \frac{D_{0max}}{d_p}$$

LDR 愈大，板材的拉深性能愈好。

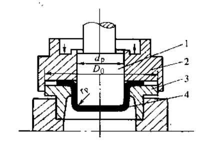


图 3.1-8　Swift 试验装置

1—冲头；2—压边圈；3—凹模；4—试件

我国习惯用极限拉深系数 m_c 表示拉深成形的极限变形程度，它是极限拉深比的倒数，故有

$$m_c = \frac{1}{\mathrm{LDR}} = \frac{d_p}{D_{0max}}$$

显然，其意义是：m_c 愈小，表明拉深变形程度愈大，拉深性能愈好。

表 3.1-46 列出了 Swift 拉深实验的标准条件。

表 3.1-46　Swift 拉深试验标准

项　　目	标　　准	选　　择
凹　　模	平面型	平面型
冲　　头	平　底	平　底
适用板厚（t_0）	0.3～1.2 mm	0.45～1.9 mm
冲头直径	$32^{+0}_{-0.05}$	$50^{+0}_{-0.05}$
冲头圆角半径	6（t_0） 标准 4.5±0.1	6（t_0） 标准 5.0±0.1
凹模圆角半径	10（t_0）	10（t_0）
模具加工精度	工具钢 700HV（60HRC）以上，表面粗糙度 0.25～0.5 μm	
间隙	1.4～2.0	
压边力	必要的最低值×（1.75～1.5）	
拉深速度	35 mm/s	
润滑油	矿物油（93.3℃ Redwood70～80 s）90%＋石腊（含氯 35%）10%	
试验值	以 0.635 mm 为单位改变毛坯外径，不产生破裂时的最大坯料直径与冲头直径之比（即 LDR）	

Swift 拉深试验能比较直接地反映板材的拉深成形性能。但也受试验条件（如间隙、压边及润滑等）的影响，使试验结果的可靠性有所降低。它的最大缺点是需制备较多的试件、经过多次试验。

② 拉深力对比试验法。拉深力对比试验也叫 TZP 法。这种试验方法是由 W·Engelhardt 和 H·Gross开发的。其试验原理是：在一定的拉深变形程度下$\left(\text{取毛坯直径 } D_0 \text{ 与冲头直径 } d_p \text{ 的比值} \frac{D_0}{d_p}=\frac{52}{30}\right)$最大拉深力与在试验中已经成形的试件侧壁的拉断力之间的关系作为判断拉深成形性能的依据。试验过程如图 3.1-9 所示。其特点之一是可一次试验成功。当试验进行到拉深力达到峰值 P_{max} 时，随即加大压边力，使试件的法兰边固定，消除以后继续变形和被拉入凹模的可能。然后，再加大冲头的作用力直到试件侧壁被拉断，并测出拉断时的力 P。

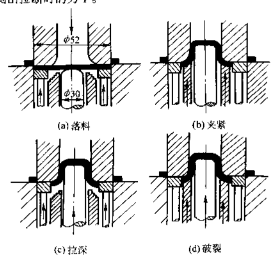


图 3.1-9　TZP 试验法

图 3.1-10 示出了拉深力对比试验中力的变化曲线。

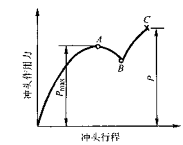


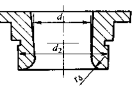
图 3.1-10　TZP 试验中力—行程曲线

根据测到的最大拉深力 P_{max} 与试件最终被拉断的力 P，可得到一个表示板材拉深性能的材料特性值 T，T 值按下式计算：

$$T=\frac{P-P_{max}}{P}\times 100\%$$

T 值愈大，板材的拉深性能愈好。

TZP 法的试验工具如图 3.1-11 所示，附表还给出了其具体尺寸。



mm

坯料厚度	d_1	d_2	r_d
0.5～1.5	32.4±0.05	$51.9^{+0.04}_{+0.02}$	4
1.5～2.0	36.5±0.05	$51.8^{+0.08}_{+0.02}$	4

图 3.1-11　TZP 试验中的凹模

2）胀形性能试验。胀形性能试验是历史较为悠久、操作简便、在目前仍然广泛采用的工艺试验方法，又称杯突试验或压穴试验。1914 年由德国的 A.E.Erichsen 做了专用的试验设备，所以也叫 Erichsen 试验。以后，胀形试验不断发展、完善。现在，不仅很多国家有自己的试验标准，而且还出现了一些新的胀形试验方法。下面，介绍两种主要的胀形试验。

① Erichsen 胀形试验。这种胀形试验的装置如图 3.1-12 所示。试验时，先将平板坯料试件放在凹模平面上，用压边圈压住试件外圈，然后，用球形冲头将试件压入凹模。由于坯料外径比凹模孔径大很多，所以，其外环不发生切向压缩变形，而与冲头接触的试件中间部分坯料受到双向拉应力作用而实现胀形变形。

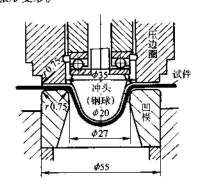


图 3.1-12　Erichsen 胀形试验装置

在胀形中当试件出现裂缝时冲头的压入深度称为胀形深度或 Erichsen 试验深度，简计为 E_r 值。E_r 值作为评定板材胀形成形能力的一个材料特性值。实际上，胀形是典型的拉伸类成形工序，故 E_r 值也是评定拉伸类冲压成形性能的一个材料特性值。很明显，E_r 值越大，胀形性能及拉伸类成形性能越好。

但是，E_r 值的影响因素很多，如板料的厚度、压边力大小、润滑条件及模具的粗糙度等对它都有影响。图 3.1-13 及图 3.1-14 示出了压边力及坯料外径对 E_r 值影响的一般规律。

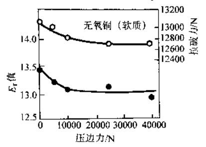


图 3.1-13 E_r 值随压边力的变化

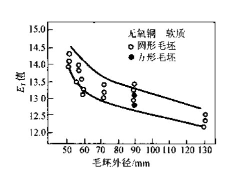


图 3.1-14 E_r 值与坯料外径

此外，由于试验设备的不同、操作方法不同以及对裂缝判断之差异等都会影响试验的结果。

传统的国产杯突试验机早已改型完毕，新型杯突试验机实现了微机控制和半自动显示读数。当然，还有其它成形性能试验设备也能做胀形试验。

表 3.1-47 列出了我国与世界上一些国家的 Erichsen 试验方法和有关标准。

表 3.1-47 ERICHSEN 试验的各种标准

标准		GB/T4156	JISZ2247	ISO－R149	DIN50102	
适用料厚/mm		一般适用≤2 （必要时 2～4）	0.1～2.0	0.5～2.0 （有时 0.5 以下也可）	0.2～2.0	0.2～1.0
工具	冲头直径	R10 球形冲头	20（钢球）	20±0.05	15±0.02	8±0.02
工具	凹模孔径	27±0.05	27±0.05	27±0.05	21±0.02	11±0.02
工具	凹模圆角半径	0.75±0.05	0.75±0.05	0.75±0.05	同左	同左
工具	凹模孔深	未作规定	未作规定	3.0±0.1（凹模壁厚＞20 mm）	3.0	同左
工具	压边圈内径	33±0.1	33	33±0.1	18±0.1	10±0.1
工具	压边圈外径	55	55	55	55±0.1	同左
工具	压边圈外径圆角	未作规定	0.75	0.75±0.1	0.75	同左
工具	硬度	冲头、凹模、压边圈 750HV 以上	凹模 600HV 以上（55HRC 以上）	冲头、凹模、压边圈 750HV 以上	同左	同左
工具	表面粗糙度	冲头球形表面应为 R_a0.05 凹模及压边圈工作表面应为 R_a0.2	凹模 0.3 s 左右抛磨光 压边圈：3 s 左右磨削光	冲头、凹模、压边圈磨光	同左	同左
试验方法	试件	试件宽度或边长为 70～90 mm，另外还规定了其他 4 种类型	90±2 的条料，方料或圆料，不得已时用 70±2	从变形中心到试件边缘最短为 45 mm	宽度为 55～90 mm、长度最小为 270 mm 的条料	宽度为 30～55 mm、长度最小为 270 mm 的条料
试验方法	试验温度	20℃±10℃（必要时可变动但需注明）	—	记录试验	18～28℃（不符合时注明）	同左
试验方法	润滑剂	无腐蚀性润滑油	凡士林	石墨	同左	同左
试验方法	压边方法	压边圈夹紧后旋回夹模 0.05 mm	压边间隙：料厚＋0.05 mm	10 kN 压边力	同左	同左
试验方法	试验速度	5～20 mm/min，破裂前应接近下限	0.1 mm/s	5～20 mm/min，最后取下限	同左	同左
试验方法	试件厚度测定	未规定	未规定	测到 0.01 mm	同左	同左
试验方法	试验终止	试件开始产生裂纹	试件有一处产生破裂	试件裂开透光时	同左	同左



② 瑞典式纯胀形试验。在 Erichsen 胀形试验条件下，试件法兰边或多或少总会有某种变形，即法兰边金属会有少许流向凹模内。于是，中间部分材料的胀形成分就不十分纯。为此，在瑞典提出了一种纯胀形试验方法，如图 3.1-15 所示，在凹模与压边圈相应位置上设置了三角形肋槽，以阻止法兰部分材料流入凹模，使球形冲头下面所对材料产生纯胀形变形。

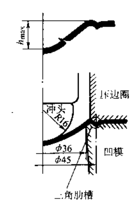


图 3.1-15 瑞典式纯胀形试验法

和 Erichsen 试验相对应，纯胀形试验结果得到最大胀形深度 h_{max}。显然，h_{max} 越大，表明板材的胀形性能越好。

但是，这种工艺试验方法尚未普及。其原因是，各种因素仍然会对试验结果产生影响，它不能从根本上取代 Erichsen 胀形试验。

3）翻边性能试验。翻边与胀形一样，都是拉伸类冲压成形中的最基本工序。作为翻边性能的工艺试验方法，目前，主要采用的是扩孔试验。下面介绍两种扩孔试验（我国的试验标准为 GB/T 15825.4—1995）。

① K·W·I 扩孔试验。K·W·I 扩孔试验是由德国的 KWI 研究所首先提出，故有此名。

其试验方法是：用有预加工小孔（小孔直径规定为扩孔冲头直径的 30%）的平板坯料进行扩孔，至孔口边缘因孔径扩大而出现裂缝时止。用极限扩孔率 λ 值作为鉴定板材翻边性能的材料特性值（参见图 3.1-16）。

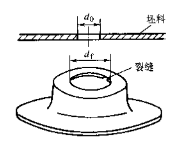


图 3.1-16 扩孔试验

极限扩孔率 λ 值按下式计算：

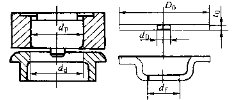
$$\lambda = \frac{d_f - d_0}{d_0} \times 100\%$$

式中，d_f 为开始出现裂缝时的孔口直径；d_0 为预加工小孔孔径。

显然，λ 值愈大，板材的翻边性能愈好。

当材料因具有各向异性、扩大的孔变成非圆形状时，需测出孔径的最大值与最小值，然后再用其平均值进行计算。

K·W·I 试验装置及有关尺寸见图 3.1-17 及其附表。



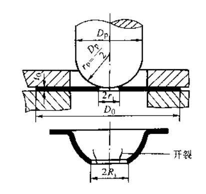
mm

冲头直径	预加工小孔孔径	凹模孔径	坯料直径	坯料厚度
55	16.5	61	>90	>2
40	12.0	44	>70	<2
25	7.5	27	<70	0.2～0.1
12	4.0	14	>25	0.2～0.1

图 3.1-17 K·W·I 扩孔试验装置及尺寸

② 福井、吉田扩孔试验。鉴于板材冲压成形性能的不断提高，在标准的 K·W·I 扩孔试验装置上进行扩孔试验，某些塑性很高的板料，在孔口边缘可能不产生裂纹。因此，为了加大各种板材的试验差值，提高试验精度，日本的福井伸二、吉田清太提出了另一种型式的扩孔试验——利用球形冲头的扩孔试验。

球形冲头扩孔试验装置与尺寸规定见图 3.1-18。其中，预加工小孔孔径取为冲头直径的 20%～25%。为了减小试验误差，规定该小孔须经铰孔或其他切削加工。



$2r_i \approx 0.2D_p$

$D_0 \geqslant 2.5D_p$

mm

t_0	D_p
0.5 以下	10～20
0.5～2.0	30～50
2.0 以上	50～100

图 3.1-18 球形冲头扩孔试验装置及尺寸

该试验结果的试验值，依然用极限扩孔率 λ 来表示，即

$$\lambda = \frac{R_i - r_i}{r_i} \times 100\%$$

式中，R_i 为开始出现裂纹时的孔口半径；r_i 为预加工小孔半径。

其评价意义也是 λ 值愈大，板材的翻边性能愈好。

4）弯曲性能试验。弯曲性能中，成形极限当然是其主要内容，但成形精度问题（包括尺寸与形状）较之其他成形工序要更为突出和重要。所以，关于弯曲性能的试验方法也

比较多。下面，仅介绍最小弯曲半径试验与反复弯曲试验（我国的弯曲试验标准按 GB/T 15825.5—1995 执行）

① 最小弯曲半径试验。最小弯曲半径是板料弯曲性能的主要评定尺度，一般用相对于板料厚度 t 的比值表示，即 r_{min}/t。此比值愈小，表明板材的弯曲性能愈好。实际上，几种弯曲试验方法均是测出弯曲外表面不致产生破坏的最小弯曲半径。

a）压弯法。如图 3.1-19a 所示，试件置于两个支柱上，用规定的压板逐渐加大压力进行压弯。支柱与试件接触面应光滑。支柱为圆柱面且半径大于 10 mm，两支柱之间的内距离是

$$b = 2r + 3t_0$$

假如包括芯轴的压板能与试件一起穿过两支柱之间，则能进行到 180°的弯曲，即板料弯成两侧平行。

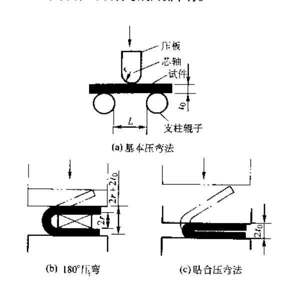


图 3.1-19 压弯试验法

也可按图 3.1-19b 所示的方法进行 180°弯曲，它是用厚度为两倍于弯曲半径的垫板使两侧压弯成平行的。

贴合弯曲时，如图 3.1-19c 所示，取消 180°弯曲中的垫板，逐渐加压，使试件两侧压靠。

b）卷弯法。卷弯法是将试件的一边固定，在另一边规定的位置上施加压力，使之逐渐弯曲。弯曲半径由心轴控制，见图 3.1-20a；或由模板控制，见图 3.1-20b。

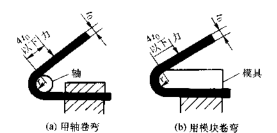


图 3.1-20 卷弯试验法

c）模弯法。用弯曲模在冲床或液压机上进行弯曲试验，不仅可以测出最小弯曲半径，而且可以测出弯曲力及弯曲弹复值等实用数据。

已颁布的金属弯曲试验标准为 GB/T 232—1999。

② 反复弯曲试验。这一弯曲性能试验方法，是将金属板料夹紧在专用试验设备的钳口内，左右反复折弯 90°，直至弯裂为止。折弯的弯曲半径 r 愈小、弯曲次数愈多，表明板料的弯曲性能愈好。

反复弯曲试验主要适用于鉴定厚度 $t \leqslant 5$ mm 板料的弯曲性能。

反复弯曲试验装置及试验方法如图 3.1-21 所示，详见国标 GB/T 235—1999 的规定。

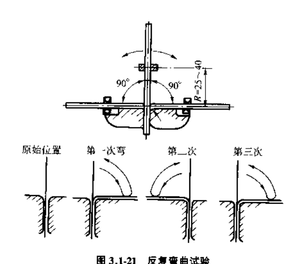


图 3.1-21 反复弯曲试验

5）球底锥形件拉深试验。判断板材对于球面形状零件的拉深成形及一些大型覆盖件的加工成形的适应能力，可以采用一种模拟这种变形特点的试验方法，即球底锥形件的拉深试验法。

球底锥形件拉深试验方法，是由福井伸二提出的，所以也称福井试验，日本于 1963 年已把它作为一种标准（我国的标准为 GB/T 15825.6—1995）。

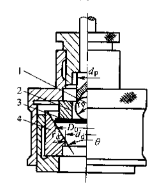


图 3.1-22 球底锥形件拉深试验装置
1—球冲头；2—压料板；3—试件；4—凹膜

这种试验方法的装置如图 3.1-22 所示。用球形冲头和锥角 θ 为 60°的凹模，在不用压边的条件下进行拉深成形，并取冲头直径 d_p 与试件外径 D_0 的比值为 $\frac{d_0}{D_0}=0.35$。当拉深试件出现破裂时，取出试件测量其口部直径，称此值为 CCV 值：

$$\mathrm{CCV} = \frac{D_{max} + D_{min}}{2}$$

或

$$\mathrm{CCV} = \frac{D_0 + D_{90} + 2D_{45}}{4}$$

式中，D_{max} 与 D_{min} 为拉深试件破裂时口部的最大直径与最小直径（图 3.1-23）；D_0、D_{90} 与 D_{45} 为板材的轧制方向（纵向）、横向与 45°方向处口部直径。

表 3.1-48 列出了该试验装置的标准，根据板料厚度分为 4 种型式。

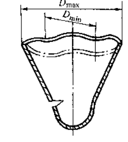


图 3.1-23 破裂后的球底锥形件

试验结果，CCV 值越小，即试件破裂时口部直径越小，反映板材可能产生的变形越大，也就表明板材的复合成形的冲压性能越好。

表 3.1-48 球底锥形件拉深试验装置的尺寸

模具类型	13 型	17 型	21 型	27 型
公称板厚/mm	0.5～0.8	0.8～1.0	1.0～1.3	1.3～1.6
凹模开口角度 θ	60°			
凹模孔直径 d_d/mm	14.60	19.95	24.40	32.00
凹模圆角半径 r_d/mm	3.0	4.0	6.0	8.0
冲头直径 d_p/mm	12.70	17.46	20.64	26.99
钢球半径 r_p/mm	$0.5d_p$			
试件直径 D_0/mm	36	50	60	78

在 Swift 拉深试验中，有时用球形冲头代替平底冲头，所得的结果也是一种复合类成形性能的材料特征值。故在进行 Swirt 拉深试验及测量 LDR 时，应加以区分这两种不同条件下的试验结果：LDR（平冲头）——反映拉深成形性能，LDR（球冲头）——反映复合成形性能。

6）硬度试验。由于金属材料硬度的测定比其他试验方法简便，故硬度试验在板材的冲压加工中也有应用。

物体硬度的基本含意是当其他物体压入时，对于这种压入变形的抵抗程度。因而，硬度与金属的塑性变形密切相关。有些塑性加工特性（如压缩加工的特性等）与材料硬度的关系更为密切。虽然硬度值与板料冲压性能的直接关系尚不十分明确，但是在生产中也常利用其间的某种间接关系来处理一些问题。

硬度试验方法与硬度值有很多种，可适用于金属板料的主要有维氏硬度（HV）、布氏硬度（HB）及洛氏硬度（HRB）等。

表 3.1-49 为部分板料的维氏硬度值；表 3.1-50 为冲压板料中常用到的三种硬度值的换算举例。

表 3.1-49 常用板料硬度

板料	维氏硬度 HV	板料	维氏硬度 HV
纯铝（软）	10～50	SPCEN	100～110
（半硬）	40～65	不锈钢	160～210
镀锌钢板	100～105	紫铜	100～115
08F	125～135	黄铜	90～100
SPCC	90～110	贝氏体钢板	450～480
SPCD	100～105		

注：此表为板厚 1.0～1.5 的部分材料的试验值。

表 3.1-50 硬度换算例

材料	HV	HRS	HRB
黄铜	98	86	54
不锈钢	208	95	209
08F	134	118	73.5

7）成形极限图试验。成形极限图（FLD）或成形极限曲线（FLC）是板料冲压成形性能发展过程中的较新成果。它的主要特点是，不仅提拱相应变形条件、变形程度下板材的成形极限，而且提供改变原设计中成形板限（或降低或提高）的工艺方向。图 3.1-24 中示出了降低成形板限的多种工艺方向。我国的试验标准见 GB/T 15825.8—1995。

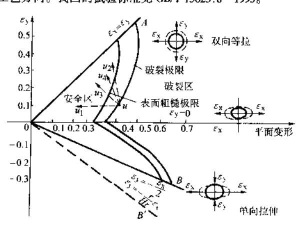


图 3.1-24 成形极限图及其用法

成形极限图的试验方法：

① 在试验用坯料上制备好坐标网格。

② 以一定的加载方式使坯料产生胀形变形，测出试件破裂或失稳时的应变 ε_x、ε_y（长、短轴方向）。

③ 改变坯料尺寸或加载条件（包括润滑方法等），重复 2）项试验，测得另一种状态下的 ε_x、ε_y。

④ 取得一定量的数据后，在平面坐标图上描绘出各试验点，然后圆滑连线，作出成形极限图 FLD。

成形板限曲线将整个图形分成如图 3.1-24 所示的三部分：安全区、破裂区及临界区。临界区的下限线为板材表面粗糙极限，上限线为破裂极限。成形板限图的概念是先由 Keeler 于 1963 年提出图的拉压部分，后由 Goodwin 又补充了图的拉拉部分。

8）拉皱试验。拉皱试验是日本吉田清太提出的，故亦称之为 YBT 试验。它是沿方形或三角形坯料的对角线方向进行拉伸，测取拉伸过程中坯料起皱高度，用以反映不均匀拉力条件下成形大尺寸零件（如汽车覆盖件等）时板料的冲压成形性能。试件的尺寸规格如图 3.1-25 所示。

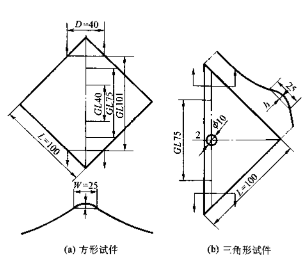


图 3.1-25 拉皱试验试件

拉皱试验的试验过程（参见图 3.1-26）如下。

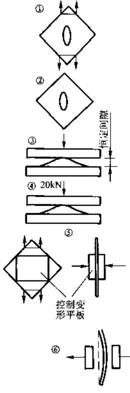


图 3.1-26 拉皱试验的试验过程

① 试件拉伸到 $\lambda_{75}=1\%$ 或 $\lambda_{101}=2\%$ 时，测其载荷作用下的起皱高度 h_1。

② 卸载，再测起皱高度 h_2，则 $\Delta h=h_1-h_2$ 是由弹复而减少的起皱高度。

③ 将已拉伸且起皱的试件压缩到一定高度数值（以工具两平而间的恒定间隙为准），然后卸载，测出其高度 h_3。

④ 再行压缩至压缩力达到一定数值（20 kN）时，卸载测出 h_4，则

$\Delta h'=h_2-h_3$ 为起皱高度压缩后的减少量；

$\Delta h''=h_3-h_4$ 为载荷对起皱高度减少量的影响值。

⑤ 在专用的两平板间作类似过程 ①的拉伸，变形到 $\lambda_{75}=1\%$。

⑥ 解除载荷及平板约束，然后测量出残余应力下的起皱高度 h_5（起皱宽度 $W=25$ 时）、h_6（起皱宽度 $W=50$ 时）。

拉皱试验可以用于研究、预测复杂形状大型零件在冲压成形时由于承受不均匀拉应力而产生的起皱缺陷、贴模问题及形状冻结性问题等。

拉皱试验中影响起皱发生、发展及弹复的因素主要是材料的特性值 σ_s、E、r 值及 n 值，复合参数 r/σ_s 也与皱高有某种关系。

拉皱试验在世界各国引起了广泛重视，认为有理论意义及实用价值。但目前尚未形成标准，且有关 YBT 的特征参数及它与实际成形性能的关系还有待更深入的研究。

2.3 常用板料的冲压性能

（1）薄钢板

按现行国家标准规定钢板分为薄板和厚板两种：凡厚度 $t\leqslant4$ mm 的钢板称之为薄板，其余为厚板。但冲压加工行业中所谓薄板，有其行业习惯的厚薄数量概念，不完全相同于此4 mm的定量界线。

板料冲压中使用的薄钢板分热轧板和冷轧板。其钢的类别（及牌号）主要包括碳素结构钢（Q195、Q235……）、优质碳素钢（08F、08Al、10……）、碳素工具钢（T7、T8……）、低合金高强度钢（16Mn、19Mn……）及电工钢（D_{11}、D_{21}……）等。以前两类使用数量更多。当然，使用从日本、韩国、德国及瑞典等国进口的薄板比例也不小（包括各种 SPCC、SPCD 等牌号）。

钢是一种铁和碳的合金，且含有少量的锰、硅、磷、硫以及铝等元素。这些元素对钢板的冲压性能有不同的影响，有的有利、有的有害，有起改善作用的地方、也有起变坏作用的地方。表 3.1-51 列举了钢中所含元素碳（C）、锰（Mn）、硅（Si）、磷（P）、硫（S）以及铝（Al）对 08 钢冲压的影响。

表 3.1-51 主要元素对 08 钢冲压性能的影响

元素	对冲压性能的影响
C	增加碳化铁的数量，提高钢板的屈服极限与强度极限，降低塑性，特别是当 Fe_3C 出现于晶界时，对冲压性能的不利影响更大
Si	硅溶于铁素体中，强化铁素体的作用很大，增加强度、降低塑性，故含硅量越低越好，08 钢的含硅量 $\leqslant0.03\%$
Mn	锰的直接影响不大，锰和硫形成 MnS 夹杂物，其数量和形态对冲压性能有影响，为了保证 08 钢的拉深性能，其含锰量不应超过 0.35%
P	磷显著地增高钢板的强度，增加脆性，并有偏析倾向，会形成较多的带状组织，对冲压性能不利
S	硫形成硫化物，对板料的冲压性能无疑是有害的，甚至它的影响是最严重的一种元素
Al	铝是钢中最终脱氧剂，铝与碳形成碳化铝，显著地降低“应变时效”倾向，容易获得“饼形”铁素体晶粒，改善冲压性能。08 钢中铝含量一般为 0.02% ~ 0.07%，最佳值为 0.03% ~ 0.05%

冲压用薄钢板中，铁素体晶粒最理想的晶粒度是 6 级；晶粒形状以“饼形”晶粒好于等轴晶粒板的冲压性能。

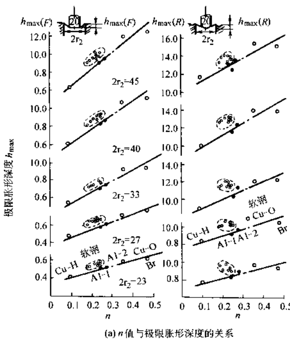
在炼钢时充分进行沸腾的钢叫做沸腾钢。沸腾钢外侧杂质含量较少，由沸腾钢轧制成的钢板叫沸腾钢板，其表面形状良好。在炼钢时添加铝、硅等元素进行充分脱氧，得到偏析甚少而质量均匀的钢叫镇静钢。镇静钢板虽比沸腾钢板要较均质，但钢板的表面形状较差。介于两者之间的半沸腾钢，其钢板称之为半沸腾钢板。

钢板的屈服极限 σ_s、强度极限 σ_b 以及屈强比对冲压性能均有影响（参见上一节内容），故在有关国标中对各种钢板的强度指标及塑性指标都作了规定，包括深冲冷轧钢板的屈强比（σ_s/σ_b）。

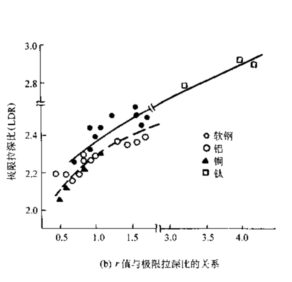
软钢板的 n 加工硬化指数值普遍在 0.1 ~ 0.5 范围中，它受冶炼轧制因素影响，如钢的铁素体中固有添加元素的存在常使 n 值变小，晶粒度和晶粒方位的不同也有不同的影响等。

钢板的各向异性系数 r 值一般在 0.5 ~ 2.0 范围里，r 值的大小主要受金属结晶方位的影响，通常是冷轧钢板的 r 值比热轧板的要较大些。

图 3.1-27a 示出了 n 值与极限胀形深度关系的实验结果，图 3.1-27b 示出了 r 值与极限拉深比关系的实验结果。从图中可以看出，它们之间均有正比或正相关关系。由此可见，n 值是胀形、翻边等拉伸类冲压成形性能的最主要判定基准；r 值是拉深、缩口等压缩类冲压成形性能的最主要判定基础；而在胀形与拉深的复合类冲压成形中，须同时考虑到 n 值和 r 值的影响。



(a) n 值与极限胀形深度的关系



(b) r 值与极限拉深比的关系

图 3.1-27　n、r 值与冲压性能的关系

图 3.1-28 给出了日本 JIS 中不同种类钢板的加工硬化指数 n 值和原向异性系数 $\bar{r}$ 的大致水平。至于图中钢板的种类与我国钢号的对比可参阅第一节。

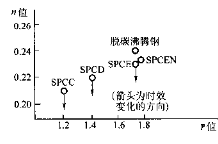


图 3.1-28　JIS 标准中 n 值、$\bar{r}$ 值的水平

钢板及其他很多金属板料（钛合金板有例外）随着厚度（t）的增加，其冲压成形性能都有一定的提高。这种板厚影响有如下两种情况：

在拉深工作中，薄料不如厚料，这是因为料薄较容易产生压缩失稳起皱，致使极限拉深系数较大，如图 3.1-29 所示。

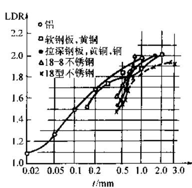


图 3.1-29　板厚与极限拉深比的关系

而在翻边、胀形工作中，随着板厚的增加，应变梯度相应减小，板材的成形极限得以提高，图 3.1-30 是翻边试验的结果。从图 3.1-30 中还可看出，球形冲头比柱形冲头（同一板厚条件下）还能降低极限翻边系数，降低程度达 10% 左右。而其翻边力可相对降低 50% 左右。这也说明，在分析使用钢板的冲压性能数据时必须注意其变形条件，像表 3.1-52 中胀形深度的数据中就有平冲头与球冲头之分，该表列出的是碳钢与合金钢板冲压成形极限的工艺实验数据。

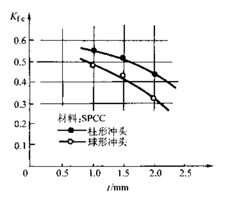


图 3.1-30　板厚与极限翻边系数的关系

表 3.1-52　碳素钢及合金钢的冲压性能

钢组	极限拉深比 LDR	极限翻边系数 K_{fc}	胀形深度 h/d		最小弯曲半径 r_{min}
			平冲头	球冲头	
碳素钢	1.85～2.15	0.77～0.65	0.28～0.38	0.45～0.60	(0.3～1.0) t
合金钢	1.85～2.06	0.77～0.70	0.24～0.34	0.40～0.55	(0.5～1.5) t

（2）不锈钢板

不锈钢按其含铬和镍元素的份量可以分为两类：铬钢和铬镍基钢。按其结晶组织的不同又可分为奥氏体钢、马氏体钢、铁素体钢、奥氏体—铁素体钢和析出硬化型钢。铬钢、铁素体型不锈钢的代表性牌号为 0Cr13、1Cr17……，铬镍基



钢、奥氏体型不锈钢的代表性牌号有0Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9Ti……；相对应日本钢号为SUS430和SUS304。

各类不锈钢的胀形性能不同，且受加工硬化指数 n 值的影响很大。图3.1-31示出了奥氏体不锈钢与铁素体不锈钢的杯突试验值 E_r 及 n 值影响的最新研究结果。

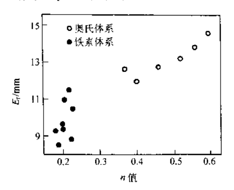


图3.1-31　不锈钢的 E_r 值及 n 值的影响

不锈钢的强度和硬度比普通软钢高，因此，其冲压加工力比较大。其中，铬钢不锈钢的冲压加工力一般达到软钢的1.4～1.6倍。铬钢的各向异性系数 r 值比软钢小，它们属于铁素体钢或马氏体钢，是在软钢中添加了12%以上的铬。

而铬镍基钢的冲压力为软钢的1.8倍左右，其 n 值比软钢大。铬镍基钢是一种奥氏体钢或奥氏体——铁素体钢，它们是在钢中添加了一定量的铬和8%以上的镍。

不锈钢的表面很光洁，在冲压加工中容易划伤。而不锈钢零件冲压成形后都不再涂饰。因此，表面划伤是不锈钢零件冲压加工中的一个特别突出的问题。对于这个问题采取的有效措施是采用聚氯乙烯涂层钢板，即在不锈钢板上铺上一张聚氯乙烯薄膜，用以保护不锈钢的表面、防止划伤。这种涂层板，在拉深时也能减少摩擦、提高拉深性能。

表3.1-53列出了不锈钢冲压性能部分数据。

表3.1-53　不锈钢的冲压性能数据

钢种	极限拉深比 LDR	极限翻边系数 $K_{f\cdot c}$	胀形深度 h/d		最小弯曲半径 r_{min}
			平冲头	球冲头	
铬钢	1.8～2.0	0.66～0.59	0.22～0.30	0.40～0.55	(1.0～2.0) t
镍铬基钢	2.0～2.16	0.61～0.57	0.28～0.34	0.45～0.68	(0.3～1.2) t

不锈钢的晶粒度对LDR及CCV值有十分明显的影响：

图3.1-32是对18－8型不锈钢的晶粒大小与专门试验法得到的极限拉深比LDR关系的研究结果。从图中明显看出，晶粒愈大，其极限拉深比愈大。

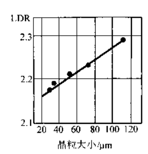


图3.1-32　不锈钢晶粒与LDR

图3.1-33示出了晶粒大小对锥杯试验值的影响。从图中可以看出，在一定的晶粒大小范围内，18－8型不锈钢与汽车钢板、7/3黄铜板相比，其CCV值随着晶粒增大而呈明显剧烈下降趋势。

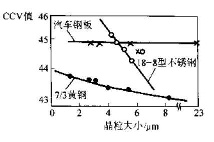


图3.1-33　晶粒大小与CCV值的关系

因为CCV值愈小以及LDR愈大，都表明冲压成形极限愈高，所以，在一定范围内，晶粒较大的不锈钢板的冲压性能是优越的。

经大变形或复杂变形的不锈钢冲压件，其残余应力较大，导致存放期可能会产生时效开裂，故一般要求成形后的零件应及时进行消除内应力的热处理。

(3) 铝及其合金板

铝材是板料冲压加工中用得最普遍的一种非铁金属。它有纯铝与合金铝之分。铝的纯度在98%以上者称为纯铝，其牌号有L1～L5。

铝的特点是塑性较高，在空气中具有良好的抗蚀性。但是，纯铝的强度很低，常通过合金化及热处理或加工硬化等方法予以提高。可应当注意，变形铝合金中，有的则不能用热处理来增加强度。

表3.1-54介绍了铝合金的冲压成形性能的实验数据。冲压加工中用得更多的铝合金板有防锈铝（5A03、5B05）及硬铝（2A11、2A12等）。

表3.1-54　铝合金板的冲压性能实验数据

材料状态	极限拉深比 LDR	极限翻边系数 $K_{f\cdot c}$	胀形深度 h/d		最小弯曲半径 r_{min}
			平冲头	球冲头	
软质	1.9～2.1	0.74～0.63	0.10～0.18	0.30～0.46	(0.5～1.2) t
$\frac{1}{4}$硬	1.4～2.0	0.87～0.67	0.06～0.25	0.12～0.40	(1.0～5.0) t
硬质	1.45～1.56	0.80～0.74	0.05～0.10	0.10～0.18	(2.0～3.0) t
淬火后自然时效	1.4～1.5	0.83～0.77	—	—	(2.5～3.5) t

从表中数据可以看出，软质态铝合金板与软钢板在拉深、翻边、胀形和弯曲性能方面大致相同。

一般地讲，铝合金的加工硬化指数 n 比纯铝大，其强度指标当然也较大。所以，铝合金的冲压力比纯铝大，而在形状性方面，前者又比后者较差。

应当指出，在用 n 值、r 值等评价板材的冲压成形性能中，铝材有时会出现特殊而例外的情况，其原因尚未有定论。

(4) 铜及其合金板

铜及其合金也是冲压加工中应用较多的非铁金属。其纯度在99%以上者为纯铜（又名紫铜），其牌号有T1～T3等；其余纯度者为铜合金。常用的铜合金有黄铜（其牌号有H68、H62等）和青铜（其牌号有QSn4－4－2.5、QBe2等）。

在冲压成形中，铜板的冲压性能试验值大致为：

极限拉深比 LDR＝1.8～1.9

极限翻边系数 $K_{f\cdot c}$＝0.69～0.63

极限胀形深度 h/d＝0.25～0.35（平冲头）

0.35～0.50（球冲头）

最小弯曲半径 r_{min} = （0.3～0.5） t

紫铜的抗压缩失稳能力较差，其拉深性能较差，例如：这里铜材的 LDR 数值，对于紫铜一定要在压边圈作用等条件下才能获得；有的紫铜在标准的锥杯试验中，因起皱严重而测不出 CCV 值的情况也时有发生。

一般情况下，青铜的冲压成形性能较差，而且，加工硬化也较为剧烈，往往需要经过中间退火才能继续经受变形。因此，青铜相对较少用于冲压成形加工。

黄铜的冲压成形性能、特别是拉深性能与晶粒尺寸有密切关系，可按表 3.1-55 适当选择黄铜板的晶粒度。

表 3.1-55　黄铜的晶粒度与用途

晶粒大小/μm	拉深场合
15	很浅的拉深
25	浅拉深件
35	深拉深且表面光洁件
50	一般深拉深
100	壁厚大的深拉深件

对于铜材冲压成形性能的鉴定，拉伸试验和 Erichsen 试验特别有效。作为材料特性值，σ_s、σ_b、δ 和 n 值更为重要，r 值也有较广泛的应用。研究表明，n 值与晶粒度密切相关，故也有用晶粒度来鉴定其冲压成形性能的，这是铜材的独特之处。黄铜的晶粒度在 15 μm 与 100 μm 之间变化（见表 3.1-59），其间相应的 n 值为 0.05～0.5，而 r 值基本上在 0.9 左右变化。

此外，黄铜拉深件常会发生时效开裂，为此，也需要有后续的消除内应力的退火。

（5）钛及其合金板

钛在室温下的金属结构是一种密集六方晶格，在转变温度直到熔点范围之内则为体心立方晶格。钛金属的抗蚀性高，能耐大气、海水及许多强烈化学试剂的侵蚀；表面色泽多变化、质感较佳与人亲和；易回收利用，符合环保特性。

钛板的 r 值非常高，拉深性能优良。曾经有人用纯钛板在室温下拉深出极限拉深系数为 0.36 的筒形零件。但钛板的弯曲性较差。钛板成形所需的变形力相当大。

钛在航空、航天工业中的应用较多。比如，近年来在波音 707～747 运输机中，钛及其合金零件占整机重量的 0.5%～5.5%，在有的战斗机里占到 20%。钛板在一般机电、日用产品中一直用得很少，但最近几年计算机硬件上使用钛板金属日渐趋多。

另一方面，钛板冲压件的冻结性差、回弹现象严重，模具较易磨损，工件表面出现粗糙和划伤也比其他金属更为明显。

以上特点是由于钛的物理性能不同于钢和其他非铁金属，其相互比较见表 3.1-56。

表 3.1-56　钛与一些金属物理性能比较

物理性能	钛	碳钢	不锈钢	铝	黄铜
密度/（g/cm³）	4.5	7.8	7.9	2.7～2.8	8.9
熔点/℃	1 660	1 430～1 535	1 430	660	1 083
热导率/W·(m·K)⁻¹	1 758	5 024～7 954	1 632	12 560～20 934	39 356
线胀系数 $\alpha/10^{-6}K^{-1}$	9.0	11～12	17.3	22～24	18.1～21
比热容/J·(kg·K)⁻¹	586	461	504	879～963	385
弹性模量 E/MPa	110 000～117 000	200 000～210 000	195 000～205 000	72 000～74 000	74 000～130 000

钛有纯钛（含 Ti 99%以上）和合金钛之分。冲压加工中主要用钛合金。国产钛板的典型牌号为 TA1、TA2、TA3、TA5、TA6、TA7，TB1、TB2，TC1、TC2、TC3、TC7、TC10 等。

钛合金板冲压加工性能的表现特点为：

1）与钢相比，钛合金的 σ_s、σ_b 高，弹性模量 E 低。因此，所需的变形力大，冲压件的弹复比较大。

2）屈强比 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b}$ 较大，有的钛材其值达 0.9 以上，故允许的变形范围很窄，拉伸类成形性能不佳。

3）延伸率 δ_u、δ 及硬化指数 n 值均较小，所以，拉伸类成形性能差。

4）强度高、硬度高，加工硬化效应较大，故多次冲压需进行中间退火。为了消除钛合金零件的残余应力，还需进行最终退火。

5）对切口和表面缺陷的敏感性高，因此，必须对其毛坯清除毛刺或用镗、磨削等精加工方法整修毛坯的边缘。

6）各向异性系数非常高，达 r = 2～6，故拉深性能比较好。

7）料厚增加对冲压成形性能的改善程度很小甚至变差，这与其他金属材料不一样。

表 3.1-57 介绍了国产钛板的一些材料特性值，同时列出了几种常用的其他材料的数值对比。

表 3.1-57　钛板的材料特性值及对比值

材料	σ_s/σ_b	r 值	HB	$\frac{r_{min}}{t}$	δ_j /%	δ /%	ψ /%	n 值	回弹指标/10⁻³
TA2	0.8～0.85	3～3.5	200～295	1.7～2.2	10～16	25～40	40～55	0.10～0.16	3.5～4.5
TA7	0.85～0.95	2.8～4.6	240～300	4～4.5	8～13	12～25	25～40	0.08～0.13	5.4～7.1
TC1	0.80～0.85	1.02～1.86	210～250	1.7～2.5	9～15	20～35	30～50	0.09～0.15	3.8～5.4
TC3	0.85～0.90	1.57～1.9	320～360	5.5～6.0	5～8	10～15	25～40	0.05～0.08	7.3～8.6
H62	0.3	1	56	0.3	20	50	66	0.20	1.1
10	0.63	1.16	140	0.3～0.5	15～24	35	55～65	0.15～0.24	1.2
1Cr18Ni9Ti	0.6	0.86	140～200	0.3～1.2	20～35	40	63	0.20～0.35	2.1
2A12	0.48～0.52	0.61	40	0.5～1.2	14～15	18	50～60	0.14～0.15	1.3

表3.1-58综合列出了前苏联文献中报道的钛合金板冲压成形性能的工艺实验数据。

钛合金板热冲压性能比冷冲压性能要好得多，从表中可清楚地看出这一点，故钛合金零件常采用热成形、热校形或超塑性成形工艺。

由于钛板较其他常用金属板有上述性能参数值上的特殊，故在冲压成形性能分类规律性方面表现出：一般服从拉深性能的评判规律；而不服从翻边、胀形性能评判规律或会表现出其特殊性。

表 3.1-58 钛合金的冲压成形性能

牌号	极限拉深比 LDR	极限翻边系数 K_{fc}	胀形深度 h/d		最小弯曲半径 r_{min}
			平冲头	球冲头	
BT1-1	$\frac{2.0\sim2.1}{2.5}$	$\frac{0.57\sim0.55}{0.5}$	$\frac{0.22\sim0.24}{0.3}$	$\frac{0.44\sim0.46}{0.5}$	$\frac{(1.5\sim2.0)\ t}{(1.0\sim1.2)\ t}$
BT1-2	$\frac{1.96\sim2.0}{2.5}$	$\frac{0.59\sim0.56}{0.5}$	$\frac{0.2\sim0.24}{0.3}$	$\frac{0.40\sim0.44}{0.5}$	$\frac{(1.7\sim2.2)\ t}{(1.0\sim1.5)\ t}$
OT4-1	$\frac{1.75\sim1.9}{2.4}$	$\frac{0.63\sim0.57}{0.5}$	$\frac{0.2\sim0.22}{0.3}$	$\frac{0.37\sim0.42}{0.5}$	$\frac{(1.7\sim2.5)\ t}{(1.2\sim2.0)\ t}$
OT4	$\frac{1.55\sim1.75}{2.2}$	$\frac{0.67\sim0.59}{0.57\sim0.53}$	$\frac{0.12\sim0.20}{0.20\sim0.24}$	$\frac{0.25\sim0.40}{0.28\sim0.32}$	$\frac{(2.5\sim3.0)\ t}{(1.5\sim2.0)\ t}$
BT4	$\frac{1.4\sim1.6}{2.0}$	$\frac{0.77\sim0.63}{0.59\sim0.56}$	$\frac{0.10\sim0.15}{0.16\sim0.20}$	$\frac{0.20\sim0.30}{0.25\sim0.30}$	$\frac{(3.5\sim4.0)\ t}{(2.2\sim2.7)\ t}$
BT5-1	$\frac{1.3\sim1.5}{2.0\sim2.1}$	$\frac{0.80\sim0.71}{0.59\sim0.57}$	$\frac{—}{0.18\sim0.22}$	$\frac{—}{0.40\sim0.42}$	$\frac{(4.0\sim4.5)\ t}{(2.5\sim3.5)\ t}$
OT4-2	$\frac{1.2\sim1.3}{1.6\sim1.7}$	$\frac{0.83\sim0.74}{0.63\sim0.59}$	$\frac{—}{0.12\sim0.16}$	$\frac{—}{0.25\sim0.35}$	$\frac{(4.5\sim5.5)\ t}{(3.0\sim3.5)\ t}$
BT6（退火态）	$\frac{1.1\sim1.15}{1.5\sim1.55}$	$\frac{0.83\sim0.77}{0.67\sim0.57}$	$\frac{—}{0.10\sim0.15}$	$\frac{—}{0.20\sim0.35}$	$\frac{(5.5\sim6.0)\ t}{(3.5\sim4.0)\ t}$
BT14（退火态）	$\frac{1.5\sim1.6}{—}$	$\frac{0.67\sim0.61}{0.63\sim0.59}$	$\frac{0.10\sim0.15}{—}$	$\frac{0.25\sim0.30}{—}$	$\frac{(3.5\sim4.5)\ t}{(2.0\sim2.5)\ t}$

注：表中分子代表冷冲压、分母代表热冲压时的实验数据。

表3.1-59列出了我国台湾最近用日本产商业用纯钛(JISGrade1)板测量其极限拉深比的一种实验结果。从表中给出LDR值也可表明，不同的压边力以及不同的润滑条件对实验结果有比较明显的影响。图3.1-34给出了用同种材料进行弯曲实验所得的一种结果：弯曲回弹角 $\Delta\alpha$ 与相对弯曲半径 r/t 近乎成正比关系。当 r/t 在3左右时，$\Delta\alpha\approx0$，随后 r/t 愈大，$\Delta\alpha$ 愈大。实验为90°弯曲角的自由弯曲，坯料尺寸为0.5 mm×10 mm×40 mm。

表 3.1-59 纯钛（Grade1）实验 LDR

压边力	2^T		0.5^T	
润滑	拉深油 TDN81	PE膜 (0.015 mm)	拉深油 TDN81	PE膜 (0.015 mm)
LDR	1.88	2.5	2.1	（未给）

注：$D_d=33.8$ mm，$R_d=6.4$ mm，$D_p=32$ mm，$R_p=4.5$ mm，$D_0=48\sim84$ mm，$t_0=0.5$ mm

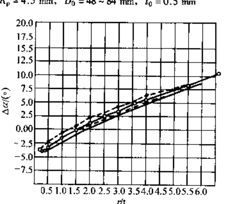


图3.1-34 钛板 $\Delta\alpha$ 与 r/t 的关系

（6）冲压用非金属材料

非金属材料中只有一部分如塑料、橡胶、木材、石棉、云母、纺织纤维制品、纸制品及皮革制品等用于冲压加工，而且主要是冲压的分离工序。

非金属材料的组织结构及性能与金属材料不同，现就其冲裁加工中的一些特点，简要说明如下：

1）云母板。云母板的绝缘性能相当优良，故广泛用作电气绝缘零件。在冲裁加工时，需用卸料器稳妥地压住坯料；而且，冲裁间隙要取得很小；另外，冲裁时不使用润滑剂，否则，将削弱云母板的绝缘性能。

2）纸、布与皮革。这类材料因十分柔软，故冲裁加工时模具刃口不能做成直角刃口，面应当将其加工成锐而锋利的刃口形状。

这类材料的冲裁加工，也可用聚氨酯冲裁模来实现。比如，用聚氨酯冲裁模冲切0.3 mm厚度的农用拖车上的轴端盖内的纸板垫圈，该零件上还均布3个 $\phi7$ 的小孔，用一复合模可一次冲成，工件质量和经济效果比用上述的尖刃冲头冲切或普通冲裁方法都好。

3）塑料与酚醛塑料（树脂）板。塑料的冲切变形机理与金属的冲裁机理完全不同。塑料冲裁的显著特点之一是回弹非常大。

塑料分为两大类：热固性塑料和热塑性塑料。而酚醛塑料是热固性塑料的典型代表。酚醛塑料板是使纤维质原料（纸和布等）浸在环氧树脂里叠合起来，在热态下加压而制作成的积层板。

酚醛塑料板主要用作绝缘板材和电器零件，冲压加工用得较多，但也只限于落料和冲孔。其落料或冲孔模除了冲裁间隙应小外，与一般金属材料的冲裁模没有什么特别不同。不过，必须注意：需在有一定温度并处在保温状态下冲压；由于工件冲切断面质量不好，通常采用冲裁后的整修来获得平滑的切口断面。



4）复合板材。树脂与钢板迭合而构成的复合钢板是冲压新材料中的一种。它包括有轻型迭层板和防振钢板两种具体结构。由于这类钢板是树脂在中间，钢板在树脂的上、下两面，因此，冲裁时，上、下钢板先被冲头与凹模切断，然后树脂才被压入剪切断。所以，在冲裁复合钢板时一定要使用压料板。间隙较小时冲裁结果更好。此外、采用高速切断则断面质量更有改善。

防振钢板冲裁时，用小间隙则工件尺寸比凹模尺寸要稍大些，用大间隙则工件断面垂直度较差。因而，都应采用压料措施，且压料力应较大，日本推荐其单位压料力为 70～100 MPa。

5）非金属材料的抗剪强度。冲压加工中所用的一些非金属材料的抗剪强度参见表 3.1-60。

表 3.1-60　非金属材料的抗剪强度

材料名称	极限抗剪强度 τ/MPa	
	管状凸模裁切	普通凸模冲裁
纸胶板	100～130	140～200
布胶板	90～100	120～180
玻璃布胶板	120～140	160～185
金属箔的玻璃布胶板	130～150	160～220
金属箔的纸胶板	110～130	140～200
环氧酚醛玻璃布板	180～210	210～240
工业橡胶板	1～6	20～80
石棉橡胶	40	—
人造橡胶，硬橡胶	40～70	—
层压纸板	100～130	140～200
层压布板	90～100	120～180
绝缘纸板	40～70	60～100
厚纸板	30～40	40～80
软钢纸板	20～40	20～30
有机玻璃	70～80	90～100
聚氯乙烯	60～80	100～130
氯乙烯	30～40	50
赛璐珞	40～60	80～100
皮革	6～8	30～50
工业用皮革	—	45～55
工业用毛毡	4～5	—
桦木胶合板	10	—
漆布、绝缘漆布	30～60	—
云母	50～80	60～100
人造云母	120～150	140～180
硬钢纸板	30～50	40～45

2.4　冲压用新材料及其性能

汽车、电子、家用电器及日用五金等工业的发展，极大地推动着现代金属薄板的发展，尤其要求能有不同新特性的冲压用板材的不断出现。

当代材料科学的发展，已经做到根据使用上与制造上的要求，设计并制造出崭新的材料，因此，很多冲压用的新型板材便应运而生。

新型冲压用板材的发展趋势见表 3.1-61。

表 3.1-61　新型冲压薄板发展趋势

内容	发展趋势	效果与目的
厚度 强度	厚→薄 低→高	产品轻型化、节能和降低成本
组织	单相→双相 单相→加磷，加钛	提高薄板强度、延伸率和冲压性能
板层	单层→涂层，迭合 单层→复合层，夹层	耐腐蚀，外表外观好，冲压性能提高抗振动，减噪声
功能	单一→多个 一般→特殊	实现新功能

现今已研制出或正在开发的冲压用新板材很多（尤其在国外）。这些新板材的名称及分类虽尚未统一，但其中较为突出的有以下三种。

（1）高强度钢板

高强度钢板是对普通钢板加以强化处理而得到的新型钢板。通常采用的金属强化的原理有：①固熔强化；②析出强化；③细晶强化；④组织强化（相态强化及复合组织强化）；⑤时效强化；⑥加工强化等。其中①～⑤是通过添加合金成分和热处理工艺来控制板材性质的。

高强度钢板的高强度有两方面的涵义：

① 屈服点高，在 260～420 MPa 范围之内。比一般铝镇静钢的屈服点要高 50%～100%；

② 抗拉强度高，目前视其 σ_b > 400 MPa（日本具体又分为热轧钢板在 370 MPa 以上，冷轧钢板在 340 MPa 以上）。日本通过组织强化处理还已研制出了超高强度钢板。其抗拉强度可达到 980 MPa（热轧）、1 470 MPa（冷轧），而对应的普通冷轧软钢板的抗拉强度只有 300 MPa。

高强度钢板的应用，能减薄料厚，减轻冲压件的重量，节省能源和降低冲压产品成本。

由于高强度钢板的强化机制常常在一定程度上要牺牲其他的成形性能，如延伸率降低、弹复大、成形力增高、厚度减薄后抗凹陷能力降低等。因此，制造技术进展的方式是分别开发适应不同冲压成形（不同冲压件）要求的高强度钢板品种。比如：

加磷钢板中的 P1 钢板，与各种级别的 08Al 板相比，在屈服极限 σ_s、强度极限 σ_b 上提高很多，而各向异性系数则居于它们中间。

低温硬化钢板又叫烘烤钢板，在冲压变形之后，于冲压件的涂漆与烘烤过程中，板材得到新的强化，使冲压件在使用状态下具有较高的强度和抗凹陷能力。这种性能称之为低温硬化性能或叫 BH 性。在同样抗凹陷能力条件下，汽车零件厚度可减薄 15%。另外，BH 性能在板的不同方向上存在差异，它可能使板的各向异性增强，利用这一点，对生产有很大实际意义。到 1995 年止，我国一汽集团就试用烘烤钢板生产了汽车车身零件 20 余万件，综合废品率仅约 1%。

双相钢板也称复合组织钢板，实际上它也属于高强度钢板中的一种。双相钢的抗拉强度与伸长率基本上成负相关关系，而抗拉强度与屈服点基本上成正相关关系。

表 3.1-62 列出了两种日本的双相钢板：铁素体＋马氏体系双相钢与铁素体＋微小珠光体系双相钢板的力学性能指标。



表 3.1-62 双相热轧钢板制造例

钢种	化学成分/%				板厚/mm	力学性能			
	C	Si	Mn	Nb		σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ_5/%	δ/%
铁素体+马氏体系	0.05	0.68	1.37	—	2.3	390	620	31	63
铁素体+微小珠光体系	0.13	0.10	1.20	—	3.0	410	550	32	74

国产冷轧 07SiMn 双相钢板（含 C0.08，Si0.39，Mn1.19，P<0.03%），厚度为 1 mm，其材料特性值与 08Al（ZF）钢之对比列于表 3.1-63 中。这种钢板已开始试用于汽车零件的生产。

表 3.1-63 07SiMn 双相钢与 08Al 性能比较

钢种	σ_s/MPa	σ_b/MPa	σ_s/σ_b	δ/%	杯突值/mm	n	r
07SiMn	335	540	0.626	33.5	10.35	0.23	0.96
08Al	180	330	0.454	43	11.8	0.234	1.7~1.8

（2）表面处理钢板

表面处理钢板是为了有效防止普通钢板发生锈蚀的缺点，而在其表面镀（涂）锌、铝等金属，后来又发展到镀（涂）有机材料的一类新型钢板。

表面处理钢板有很多种，比如：镀层金属型的，有热镀 Zn、镀 Zn-Fe 板及电镀 Zn、镀 Zn-Ni（或 Fe）板；镀两层金属型的，有镀 Fe-Zn、Al-Mn 板；在金属镀层上再涂树脂薄膜的镀层板；还有彩色镀层板等。当然，传统的镀锡、镀锌板等也属于表面处理钢板，但不适宜作现代汽车零件用。

电镀锌板与热镀锌板相比，抗腐蚀能力大为提高，其镀层与基体钢的结合性能以及加工性能均属优良。

锌铬镀层板已用作汽车车身零件。由于这种板有良好的焊接性、成形性和抗腐蚀能力，不仅利于加工，而且延长了使用寿命。

与镀锡钢板相对应的一种无锡钢板的出现，不但可以节省稀少昂贵的锡，还可延长食品的储存期，改善罐头的使用性能，大有同铝制食品罐相互竞争之势。

在涂层板中，各种涂覆有机膜层的板材有更好的防腐蚀、防表面损伤的性能。因此，正被大量用作各类结构零件。日本等国 1970 年代就开发了生产涂覆氯化乙烯树脂的钢板：在 0.2~1.2 mm 厚的基本钢板上涂覆 0.1~0.45 mm 厚的树脂，其结构如图 3.1-35 所示。

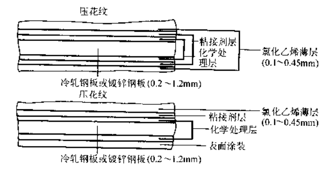


图 3.1-35 氯化乙烯涂层薄钢板示意图

涂覆塑料薄膜钢板还有一优点，即可以提高冲压成形性能。例如用双面涂覆 0.04 mm 聚氯乙烯薄膜的 08F 钢板拉深，其极限拉深系数 m_t 比 08F 钢板降低 12%，拉深件的相对高度提高 29%。为了更有效的提高塑料涂层板的冲压成形性能，塑料涂层在基体钢上应有单双面之分，以适应不同成形工艺与变形特征的要求。所以，至晚可追溯到在 40 余年前，一种以钢为基体、多孔性青铜为中间层、塑料为表层的板材已开始用于汽车、飞机及核反应堆氦循环器中的轴承零件等。

其实，加入有新元素的耐腐蚀钢板，如耐大气腐蚀钢板等也可归属于这类表面处理钢板之中，因为它也是增强了普通钢板冲压件的抗腐蚀能力。我国研制的耐大气腐蚀钢板中，有 10CuPCrNi（冷轧）和 9CuPCrNi（热轧），其耐蚀性与普通碳素钢板相比可提高 3~5 倍。10CuPCrNi 钢与 Q235A 钢板的材料特性值比较列于表 3.1-64 中。

表 3.1-64 10CuPCrNi 钢与 Q235A 钢板材料特性值

材料 \ 指标	σ_s/MPa	σ_b/MPa	σ_s/σ_b	δ/%	n	r	Δr	CCV/mm	E_r/mm
10CuPCrNi	378	507	0.74	20.7	0.211	0.548	0.376	128.57	5.6
Q235A	240	363	0.66	21.4	0.237	0.727	-0.343	127.44	7.0

注：钢板料厚均为 $t=2.5$ mm。

（3）叠层复合板

作为冲压加工中用的叠层复合板，是叠层不同金属的金属复合板以及两块金属板之间夹持树脂层的树脂夹层板。如图 3.1-36 所示，其中，金属复合板（图 3.1-36a）往往具有比单一板更优良的性能，尤其表现在耐蚀性、导热性、导磁性及轻量化等方面。这类叠合复板合已经并正在开发的有不少种。轻型夹层板（图 3.1-36a）为了轻量化目的，中间树脂夹层比较厚且硬（用尼龙等）。而防振钢板（图 3.1-36c）中间夹层的黏弹性树脂则比较薄且软。

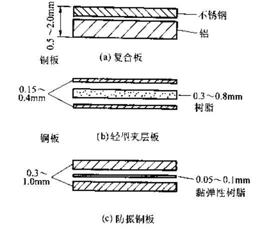


图 3.1-36 叠层复合板示例

现今，国外重点开发研制的叠合复合板材是轻型夹层板和防振钢板。它们均是在两层薄钢板之间夹持树脂夹层，形成所谓“三明治”型复合板材。这种叠合复合板材具有比被复合之单体材料所不具有的优点。但是，其冲压成形性能，比单体材料较差的也不少，在单体材料成形过程中所预想不到的成形缺陷问题也时有发生。因此，世界各国都在对此进行研究。

比如，有研究表明：防振型复合钢板的 n 值、r 值及均匀延伸率等均与塑料夹层的性质关系不大，大体上和表层钢板的 n 值、r 值及均匀延伸率相同；但极限拉深比随夹层厚度的增加而减小，耐起皱能力随厚度的增加而下降；其胀形高度和扩孔率 λ 基本上不受塑料夹层性能影响，而主要取决于表层钢板的冲压性能。对轻型夹层板的成形缺陷问题，如比较严重的弯曲开裂规律与对策、弹复现象更为严重的原

因及防止措施等，已有不少研究报告。

20世纪末，复合板在冲压成形性能方面的优越性及特点，已经从有关理论分析计算和实验测试中得到了很多证明和解释。例如，用3种不同的金属板，分别为SUS430、铝及SUS304构成了层板的复合板，实验测试了各种板及其复合板的成形极限曲线，还进行了数值解析，计算出了其成形极限曲线的预测值，并将结果进行了比较，如图3.1-37所示。从其结果可以看出：冲压成形性较差的材料（比如SUS430）如果与成形性能良好的材料（铝、SUS304）迭层复合，其成形性能会有显著的提高。

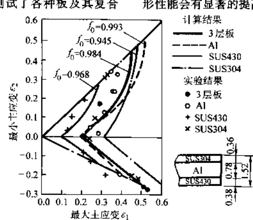


图3.1-37　3层金属复合板及其单一板的成形极限图

编写：卢险峰（南昌大学）



第2章 冲 裁

冲裁是使板材分离的冲压工艺。它是落料、冲孔、切断、切边、切口和剖切等工序的总称。冲裁模包括相应完成上述各工序的落料模、冲孔模、切断模、切边模、切口模和剖切模等。

1 冲裁机理

1.1 冲裁变形过程

冲裁变形过程示意图见图 3.2-1，分为三个阶段：

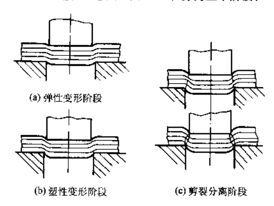


图 3.2-1 冲裁变形过程

1）弹性变形阶段。如图 3.2-1a 所示，凸模施加压力尚小，材料产生弹性压缩和弯弯，并略有挤入凹模口。但材料内的应力未超过弹性极限，一旦压力消除仍将恢复原状。

2）塑性变形阶段。如图 3.2-1b 所示，材料内的应力超过屈服点，凸模压入材料，产生纤维的拉伸和弯曲，得到光亮的剪切带。

3）剪裂分离阶段。如图 3.2-1c 所示，材料内的应力达到抗剪强度，冲裁力达到最大值，光亮终止。由于应力集中和出现拉应力，靠近凸模、凹模刃口处的材料出现裂纹，在凸模和凹模刃口间的间隙合理时，上、下裂纹向内扩展最后重合，材料分离，形成粗糙锥形剪裂带。

1.2 冲裁力－行程曲线

冲裁力－行程曲线示于图 3.2-2。曲线 1 是典型的塑性材料冲裁力－行程曲线，*OA* 段为弹性变形阶段，对应于图 3.2-1 的 a 图，凸模加压尚小，材料产生弹性压缩略有挤入凹模，泄压仍恢复原状。*AB* 段为塑性变形阶段，对应于图 3.2-1 的 b 图，凸模压入材料的过程中，承受冲裁力的剪切面积不断减少而材料的加工硬化不断增加，在曲线的 *AB* 段，材料加工硬化大于剪切面减少的影响，冲裁力呈不断增加的趋势，这种消长过程逐渐减弱，曲线斜率逐渐减小而出现极值达到 *B* 点，冲裁力达到最大值，此时塑性变形阶段结束，刃口处产生裂纹。*BC* 段为剪裂分离阶段，对应于图 3.2-1 的 c 图，模具刃口出现裂纹后，剪切面积的减少超过材料加工硬化的影响，冲裁力开始下降，裂纹发展。上、下裂纹重合出现断裂时，冲裁力急剧下降。曲线 2 是低塑性材料的冲裁力-行程曲线，由于材料的塑性差屈强比高，凸模刚压入材料冲裁力就迅速达到了峰值，出现裂纹和断裂，冲裁力急剧下降，比较曲线 1 和曲线 2 可以看出，出现最大冲裁力时凸模压入材料的深度因材料的屈强比而异，它是影响最大冲裁力的重要因素。详见第 2.5 节冲裁力计算部分。

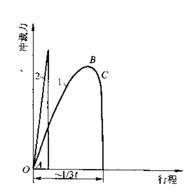


图 3.2-2 冲裁力－行程曲线示意图
1—塑性材料；2—低塑性材料

1.3 变形区受力状况和应力状态

冲裁时凸、凹模作用于材料的力示于图 3.2-3。P_p、P_d 为凸模和凹模作用于材料上的垂直压力；F_p、F_d 为凸模和凹模作用于材料上的水平压力；μP_p、μP_d 为凸模端面和凹模端面作用于材料的摩擦力；μF_p，μF_d 为凸模侧面和凹模侧面作用于材料的摩擦力；*M* 为 P_p 和 P_d 不在一直线上而产生的弯矩，它使材料产生弯曲；*M'* 为 F_p 和 F_d 所形成的抗弯矩，保持冲裁过程每一瞬间的平衡。

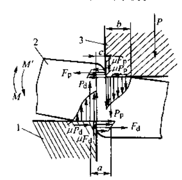


图 3.2-3 冲裁变形区受力状况
1—凹模；2—材料；3—凸模

垂直压力使材料分离，摩擦力使模具刃口部分产生磨损，弯矩使材料产生弯曲。

冲裁时变形区的应力状态图示于图 3.2-4。由于受冲裁时

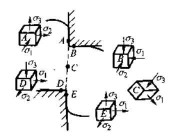


图 3.2-4 冲裁变形区应力状态图

材料弯曲的影响，弯曲内侧靠近凸模的材料受压、弯曲外侧靠近凹模的材料受拉，反映在应力状态图上，凸模刃口端面 B 点和侧面 A 点处的静水压分别高于凹模端面 D 点和侧面 E 点处的静水压，即凸模刃口周围的静水压高于凹模刃口周围的静水压，因此一般认为凸、凹模刃口处裂纹的产生，凹模侧先于凸模侧。

1.4 冲裁件断面特征

冲裁件的断面由塌角、光亮带、断裂带和毛刺组成，如图 3.2-5 所示。它和冲裁过程的各变形阶段相对应，塑性变形阶段对应在冲裁件断面上形成塌角和光亮带。塌角是模具刚压入材料塑性变形开始时带着刃口附近的材料沿冲裁方向流动，促使周边的材料纤维伸长和弯曲的结果。光亮带是模

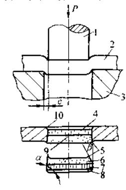


图 3.2-5 冲裁件断面
1—凸模；2—板料；3—凹模；4、7—光亮带；5—毛刺；6、9—断裂带；8、10—塌角

具继续压入时，材料被模具侧面挤压而形成的表面，光亮带光滑且垂直，是冲裁件断面上质量最高的部分。光亮带一般约占全断面的 1/3 左右，塑性好的材料其光亮带大，光亮带的大小还与模具间隙和刃口的状况有关。断裂带是在断裂阶段刃口处的微裂纹在拉应力的作用下，裂纹不断扩展而形成的撕裂面，表面粗糙无光泽，与板面不垂直，略有斜度。冲裁件断面上的毛刺是作为缺陷而存在的，毛刺的大小和刃口的状况、间隙的大小和均匀程度以及材料的性能等诸种因素有关，生产中采取了许多技术措施，即使是采取了精冲技术也难以根除毛刺，只能抑制和减小毛刺。

2 冲裁件的工艺性

冲裁件的工艺性是指该零件冲裁时的难易程度，在一般情况下，影响冲裁件工艺性的因素有：冲裁件的几何形状、尺寸公差、形位公差、断面质量、材料性能和料厚等。其中冲裁件的几何形状是主要影响因素。

冲裁件几何形状对工艺性的影响称为冲裁件的结构工艺性。

2.1 冲裁件结构工艺性

冲裁件的几何形状，在满足技术要求的前提下，应力求简单，尽可能是规则的几何形状，避免尖角。正确地设计冲裁件几何形状有利于提高产品质量，提高模具寿命，降低生产成本。冲裁件的尺寸极限，如最小孔径、最小槽宽等主要取决于模具的强度，冲裁件的质量和模具寿命等因素。

(1) 冲裁件的圆角

冲裁件各直线或曲线的连接处，宜有适当的圆角过渡，其数值见表 3.2-1。

表 3.2-1 冲裁件最小圆角半径

连接角度	$\alpha>90°$	$\alpha<90°$	$\alpha>90°$	$\alpha<90°$
简图	R, $\alpha>90°$	R, $\alpha<90°$	R, $\alpha>90°$	R, $\alpha<90°$
低碳钢	$0.30t$	$0.50t$	$0.35t$	$0.60t$
黄铜、铝	$0.24t$	$0.35t$	$0.20t$	$0.45t$
高碳钢、合金钢	$0.45t$	$0.70t$	$0.50t$	$0.90t$

注：t 为材料厚度，mm。

在用一道工序冲裁时，拐角处应尽量采用较大的圆角。冲裁件如果有尖角，不仅模具制造困难，而且模具也容易损坏。只有在采用少无废料排样或镶拼模具结构时，才允许冲裁件有光锐的清角。

(2) 冲裁件的悬臂或窄槽

冲裁件凸出的悬臂或凹入的窄槽不宜太长或太窄，见图 3.2-6，否则会降低模具寿命。一般情况下，B 应该不小于 $1.5t$，当工件材料为黄铜、铝和软钢时，$B \geq 1.3t$，当工件材料为高碳钢时，$B \geq 1.9t$，当工件厚度 $t<1$ mm 时，按 $t=1$ mm 计算，槽宽与槽长的关系为 $L \leq 5B$。

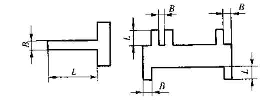


图 3.2-6 悬臂或窄槽

(3) 冲孔极限尺寸

因受凸模强度和稳定性的限制，冲裁件孔的尺寸不宜过小，其数值与孔的形状、材料的力学性能和厚度有关。一般冲模冲孔的最小尺寸如表 3.2-2 所示。

表 3.2-2 冲孔的最小尺寸

材料	自由凸模冲孔		精密导向凸模冲孔	
	圆孔直径 d	长方孔宽 b	圆孔直径 d	长方孔宽 b
硬钢	$1.3t$	$1.0t$	$0.5t$	$0.4t$
软钢及黄铜	$1.0t$	$0.7t$	$0.35t$	$0.3t$
铝	$0.8t$	$0.5t$	$0.3t$	$0.28t$
酚醛层压布（纸）板	$0.4t$	$0.35t$	$0.3t$	$0.25t$

注：t 为材料厚度，mm。

(4) 孔间距与孔边距

孔与孔之间或孔与边缘之间的距离 a 如图 3.2-7 所示。受模具强度和冲裁件质量的限制，其值不能太小，宜取 $a \geq$



2t，并不得小于3~4 mm。必要时可取 $a=(1\sim1.5)\ t$（当 $t<1$ mm时，按 $t=1$ mm计算），但模具寿命会因此降低或结构复杂程度增加。

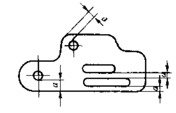


图3.2-7 孔间距和孔边距

(5) 在弯曲件或拉深件上冲孔

在弯曲件或拉深件上冲孔时，其孔边与工件直壁之间的距离不能小于图3.2-8所示数值。如果距离过小，孔边会包括工件底部的圆角部分，冲孔时凸模将因受到水平推力而易折断，孔的质量也受影响。

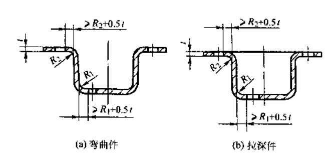


图3.2-8 孔与直边间距离

2.2 冲裁件的精度与表面粗糙度和毛刺高度

(1) 冲裁件的精度

表3.2-3~表3.2-6所提供的冲裁件尺寸精度，是在合理间隙情况下对铝、铜、软钢等常用材料冲裁加工的数据。

表3.2-3 冲裁件外径尺寸的标准公差 mm

材料厚度	普通冲裁精度				精密冲裁精度				整修精度		
	工件外径										
	10以下	10~50	50~150	150~300	10以下	10~50	50~150	150~300	10以下	10~50	50~100
0.2~0.5	0.08	0.10	0.14	0.20	0.025	0.03	0.05	0.08	—	—	—
0.5~1.0	0.12	0.16	0.22	0.30	0.03	0.04	0.06	0.10	0.012	0.015	0.025
1.0~2.0	0.18	0.22	0.30	0.50	0.04	0.06	0.08	0.12	0.015	0.02	0.03
2.0~4.0	0.24	0.28	0.40	0.70	0.06	0.08	0.10	0.15	0.025	0.03	0.04
4.0~6.0	0.30	0.35	0.50	1.00	0.10	0.12	0.15	0.20	0.04	0.05	0.06

表3.2-4 冲裁件内径尺寸的标准公差 mm

材料厚度	普通冲裁精度			精密冲裁精度			整修精度	
	工件内径							
	10以下	10~50	50~150	10以下	10~50	50~150	10以下	10~50
0.2~1	0.05	0.08	0.12	0.02	0.04	0.08	0.01	0.015
1~2	0.06	0.10	0.16	0.03	0.06	0.10	0.015	0.02
2~4	0.08	0.12	0.20	0.04	0.08	0.12	0.025	0.03
4~6	0.10	0.15	0.25	0.06	0.10	0.15	0.04	0.05

表3.2-5 孔间距离的标准公差 mm

材料厚度	普通冲裁精度			精密冲裁精度		
	中心距离					
	50以下	50~150	150~300	50以下	50~150	150~300
1以下	±0.1	±0.15	±0.2	±0.03	±0.05	±0.08
1~2	±0.12	±0.20	±0.3	±0.04	±0.06	±0.10
2~4	±0.15	±0.25	±0.35	±0.06	±0.08	±0.12
4~6	±0.2	±0.30	±0.4	±0.08	±0.10	±0.15



表 3.2-6　孔对外缘轮廓的标准公差　　mm

模具形式和定位方法	模具精度	工件尺寸		
		< 30	30 ~ 100	100 ~ 200
复　合　模	高精度	±0.015	±0.02	±0.025
	普通精度	±0.02	±0.03	±0.04
有导正销的连续模	高精度	±0.05	±0.10	±0.12
	普通精度	±0.10	±0.15	±0.20
无导正销的连续模	高精度	±0.10	±0.15	±0.25
	普通精度	±0.20	±0.30	±0.40
外形定位的冲孔模	高精度	±0.08	±0.12	±0.18
	普通精度	±0.15	±0.20	±0.30

(2) 冲裁件的表面粗糙度

冲裁件的表面粗糙度数值一般在 Ra12.5 μm 以下，具体数值可参照表 3.2-7。冲裁件断面光亮带的宽度由被冲材料的厚度、力学性能以及模具间隙、刃口锋利程度而定。如表 3.2-8 所示。

表 3.2-7　冲裁件剪切面的近似表面粗糙度

材料厚度 t/mm	≤1	>1~2	>2~3	>3~4	>4~5
表面粗糙度 Ra/μm	3.2	6.3	12.5	25	50

表 3.2-8　冲裁件断面光亮带占料厚的百分比

材　料	占料厚的百分比/%		材料	占料厚的百分比/%	
	退火	硬化		退火	硬化
含碳 0.1%钢板	50	38	硅钢	30	—
含碳 0.2%钢板	40	28	青铜板	25	17
含碳 0.3%钢板	33	22	黄铜	50	20
含碳 0.4%钢板	27	17	纯铜	55	30
含碳 0.6%钢板	20	9	杜拉铝	50	30
含碳 0.8%钢板	15	5	铝	50	30
含碳 1.0%钢板	10	2			

注：含碳百分数为质量分数。

(3) 毛刺高度

冲裁件允许的毛刺高度见表 3.2-9。

表 3.2-9　冲裁件允许的毛刺高度　　μm

冲件材料厚度 t /mm	材料抗拉强度 σ_b/MPa											
	< 250			250 ~ 400			400 ~ 630			> 630 和硅钢		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
≤0.35	100	70	50	70	50	40	50	40	30	30	20	20
0.4 ~ 0.6	150	110	80	100	70	50	70	50	40	40	30	20
0.65 ~ 0.95	230	170	120	170	130	90	100	70	50	50	40	30
1 ~ 1.5	340	250	170	240	180	120	150	110	70	80	60	40
1.6 ~ 2.4	500	370	250	350	260	180	220	160	110	120	90	60
2.5 ~ 3.8	720	540	360	500	370	250	400	300	200	180	130	90
4 ~ 6	1 200	900	600	730	540	360	450	330	220	260	190	130
6.5 ~ 10	1 900	1 420	950	1 000	750	500	650	480	320	350	260	170

注：Ⅰ类——正常的毛刺；Ⅱ类——用于较高要求的冲件；Ⅲ类——用于特高要求的冲件。

3　冲裁间隙

冲裁间隙系凸、凹模刃口间缝隙的距离，用符号 c 并以板厚 t 的百分数表示，见图 3.2-9。冲裁间隙是冲压工艺和模具设计中的重要参数，它直接影响冲裁件的质量、模具寿命和力能的消耗，应根据实际情况和需要合理地选用。

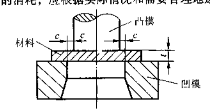


图 3.2-9　冲裁间隙示意图

3.1　间隙对冲裁过程的影响

从上述冲裁机理的分析中可知：

1) 冲裁变形集中在凸、凹模刃口所限定的间隙范围之内。

2) 塑性变形阶段结束时在模具刃口处产生裂纹，凹模先于凸模裂纹首先在刃口的侧面产生。

3) 间隙的大小直接影响冲裁的变形过程，间隙较大时，材料中的拉应力将会增大，容易产生裂纹，使塑性变形阶段提前结束，因此光亮带要小一些，面断裂带、塌角和毛刺均相应增加，冲裁件的翘曲现象也较显著。反之，间隙较小时，材料中拉应力成分减小，静水压效果增强，裂纹的产生受到抑制，塑性变形阶段滞后结束，所以光亮带增大，而断裂面、塌角、斜度和翘曲等均相应减小。间隙值在合适的范围内时，凸、凹模刃口处的裂纹基本重合于一线，如图 3.2-10b 所示，此时冲裁件断面如图 3.2-11b 所示。光亮带约占料厚的 1/3 左右，塌角、毛刺和斜度均不大，可满足一般冲裁的要求。间隙过小或过大时，将导致凸、凹模刃口处的裂纹不能相交重合于一线如图 3.2-10a、c 所示。间隙过小时，凸模刃口附近的裂纹比正常间隙时向外错开一段距离，这样上、下两裂纹中间的材料随着冲裁过程的进行将被第二次剪切，并在断面上形成第二个光亮带如图 3.2-11a 所示。间隙过大时，凸模刃口附近的裂纹较正常间隙向里错开一段距

离，材料受到更大的拉伸，断面上的光亮带减小，塌角、斜度和毛刺增大如图 3.2-11c 所示。

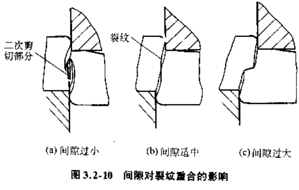


图 3.2-10 间隙对裂纹重合的影响

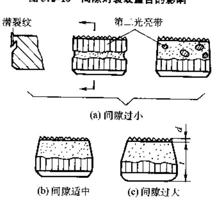


图 3.2-11 间隙对冲裁件断面的影响

4）间隙的大小影响冲裁过程，进而影响冲裁件的断面质量、尺寸精度、模具寿命和力能参数。图 3.2-12 为间隙对冲裁件断面质量的影响曲线，可以看出：间隙增大时，光亮带减小，塌角、毛刺和断面斜角都有增大的趋势。图 3.2-13 所示为间隙对冲裁件尺寸精度的影响。

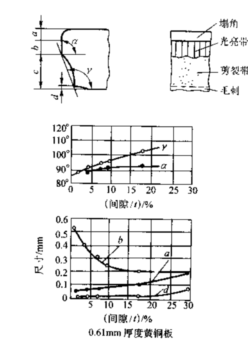


图 3.2-12 间隙对冲裁断面质量的影响

a—塌角；b—光亮带；c—断裂带；d—毛刺；α—光亮带斜角；γ—断裂带斜角；t—板厚

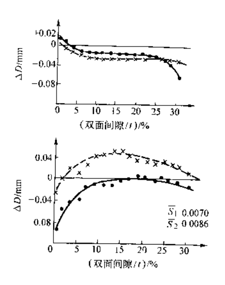


图 3.2-13 间隙对冲裁件尺寸精度的影响（t 为板厚）

落料 ΔD = 冲裁件外径 - 凹模孔直径

冲孔 ΔD = 冲孔直径 - 凸模外径

材料 带钢

$\bar{S}_1$，$\bar{S}_2$ 尺寸不平度的平均值

—·—·—轧制方向（$\bar{S}_1$） —×—×—垂直于轧制向方向

冲裁件的尺寸精度是指冲裁件的实际尺寸与公称尺寸之差，除了模具制造偏差之外，这个差值主要是指冲裁件相对于模具刃口尺寸的偏差。落料时尺寸偏差 ΔD = 冲裁件外径 - 凹模直径；冲孔时尺寸偏差 ΔD = 冲孔直径 - 凸模直径。尺寸偏差 $\Delta D = 0$ 时；则认为其尺寸精度好。但实际生产中冲件尺寸和模具刃口尺寸之间，大多数情况下均存在一定的偏差，这主要是冲裁后材料产生弹性恢复所致。在自由冲裁时，材料会产生弯曲，冲裁件外径尺寸的最大处位于光亮带和断裂带的分界处，冲裁过程冲件产生弯曲，该分界线位于材料中性层以上时，弹性恢复后冲件尺寸增大，反之在材料中性层以下时，则尺寸减小。

从图 3.2-13 可以看出，间隙对于落料和冲孔尺寸精度的影响规律是不相同的，另外还给出了材料纤维方向的影响。

模具寿命按冲出合格冲件的数量来计算，用它来衡量模具耐磨损的程度。模具产生磨损需具备二个条件：和材料有相对运动、存在摩擦并相应作用有正压力。实践表明：冲裁过程中无论是落料或冲孔，凸、凹模端面和侧面刃口处都具备上述两个条件而产生磨损。离开刃口区，虽然侧面和材料间有相对运动存在摩擦，但侧向压力小，端面虽然冲裁力作用的压力很大，但没有材料的相对移动不存在摩擦，因此均不产生磨损。冲裁模的磨损主要集中在刃口部位较小的范围之内，这种特点使冲裁模可以进行多次的刃磨和修复，因此模具寿命有一次刃磨寿命和总寿命。

间隙是模具寿命的重要影响因素，间隙减小，模具刃口和材料间的摩擦增加，刃口磨损加快，因此过小的间隙对模具寿命十分不利；而较大的间隙可使模具刃口和材料间的摩擦减小，有利于提高模具寿命，因此合理选用大间隙，可显著提高模具寿命，经济效果突出。

间隙对冲裁力的影响不十分显著，此处所指的冲裁力是冲裁力--行程曲线上的最大值。从上面的分析中得知，间隙减小时，静水压的效果增加、抗剪强度增加，但此时由于塑性变形阶段增长、光亮带增加，剪断面积相应减小；间隙增大时，抗剪强度降低，但此时由于塑件变形阶段减短，光亮带减小，剪断面积相应增加。表明间隙对抗剪强度和剪断面



积的影响是相互消长的，由于最大冲裁力是塑性变形阶段结束时抗剪强度和剪断面积的乘积，因此一般认为间隙的变化对冲裁力的影响不显著。

3.2 冲裁间隙分类

由于冲压工艺覆盖面宽、行业多、产品差异极大以及历史的原因，20世纪80年代以前，我国冲压技术领域有关冲裁间隙的技术规范比较混乱，影响了机械制造业的发展。为此，当时针对冲裁间隙问题，组织了国内有关单位，开展广泛的调研，在吸收国内外研究成果和生产经验的基础上，进行了补充实验和研究。制订了冲裁间隙指导性技术文件（TB/Z 271—1986），通过十多年的贯彻实施，在此基础上，经过广泛征求意见和修订，最后通过国家技术监督局批准为国家标准。冲裁间隙（GB/T 16743—1997），具有权威性。该标准采取“按质定隙”的原则，在以满足冲件质量为主兼顾模具寿命和力能消耗的原则下，将冲裁间隙分成三种类型，即Ⅰ类（小间隙）、Ⅱ类（中间隙）、Ⅲ类（大间隙）。列于表3.2-10。

按照表3.2-10的分类、各种金属材料相应的冲裁间隙值列于表3.2-11。

表 3.2-10 金属材料冲裁间隙分类

分类依据 \ 类别			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
冲件断面质量	剪切面特征		毛刺一般 α小 光亮带大 塌角小	毛刺小 α中等 光亮带中等 塌角中等	毛刺一般 α大 光亮带小 塌角大
		塌角高度 R	$(4\sim7)\%t$ ①	$(6\sim8)\%t$ ①	$(8\sim10)\%t$
		光亮带高度 B	$(35\sim55)\%t$	$(25\sim40)\%t$	$(15\sim25)\%t$
		断裂带高度 F	小	中	大
		毛刺高度 h	一般	小	一般
		断裂角 α	$4°\sim7°$	$>7°\sim8°$	$>8°\sim11°$
冲件精度	平面度		稍小	小	较大
	尺寸精度	落料件	接近凹模尺寸	稍小于凹模尺寸	小于凹模尺寸
		冲孔件	接近凸模尺寸	稍大于凸模尺寸	大于凸模尺寸
模具寿命			较低	较长	最长
力能消耗	冲裁力		较大	小	最小
	卸、推料力		较大	最小	小
	冲裁功		较大	小	稍小
适用场合			冲件断面质量、尺寸精度要求高时，采用小间隙。冲模寿命较短	冲件断面质量、尺寸精度要求一般时，采用中等间隙。因残余应力小，能减少破裂现象，适用于继续塑性变形的工件	冲件断面质量、尺寸精度要求不高时，应优先采用大间隙，以利于提高冲模寿命

① t 为板厚。



表 3.2-11 金属材料冲裁间隙值

材料	抗剪强度 τ /MPa	（初始间隙（单边间隙）/t[①]）/%		
		Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类
低碳钢 08F、10F、10、20、Q235A	≥210~400	3.0~7.0	>7.0~10.0	>10.0~12.5
中碳钢 45 不锈钢 1Cr18Ni9Ti、4Cr13 膨胀合金（可伐合金）4J29	≥420~560	3.5~8.0	>8.0~11.0	>11.0~15.0
高碳钢 T8A、T10A 65Mn	≥590~930	8.0~12.0	>12.0~15.0	>15.0~18.0
纯铝 1060、1050A、1035、1200 铝合金（软态）5A21 黄铜（软态）H62 纯铜（软态）T1、T2、T3	≥65~255	2.0~4.0	4.5~6.0	6.5~9.0
黄铜（硬态）H62 铅黄铜 HPb59-1 纯铜（硬态）T1、T2、T3	≥290~420	3.0~5.0	5.5~8.0	8.5~11.0
铝合金（硬态）2A12 锡磷青铜 QSn4-4-2.5 铝青铜 QA17 铍青铜 QBe2	≥225~550	3.5~6.0	7.0~10.0	11.0~13.0
镁合金 MB1、MB8	≥120~180	1.5~2.5		
电工硅钢 D21、D31、D41	190	2.5~5.0	>5.0~9.0	

① t 为板厚。

3.3 确定冲裁间隙的方法

确定冲裁间隙的主要原则是在保证冲裁件尺寸精度和满足剪切面质量要求的前提下，结合考虑模具寿命、模具结构、冲件尺寸和形状以及生产条件等因素，综合分析后确定。贯彻"分主次，有取舍"的原则，藉以实现技术和经济效果的统一。比如，当冲件的尺寸精度和剪断面质量要求较高时，必须采用小间隙，宁可模具寿命低一些，也必须如此权衡；当冲件的尺寸精度和剪断面质量要求一般时，宜选用中等间隙，此时模具寿命较长，力能消耗小；当冲件的尺寸精度和剪断面质量要求不高时，宜优先采用大间隙，可大幅度提高模具寿命，卸料、出件容易，可简化模具结构，方便模具加工，经济效果显著。

选用金属材料冲裁间隙，应针对冲件的技术要求和特定的生产条件等因素，根据上述间隙的选取原则，按表 3.2-10 确定拟采用的间隙类别，然后按表 3.2-11 相应选取该类间隙的比值，经计算可得到间隙值。以此值为基础，再按下列情况酌情增减间隙值。

1）在同样情况下，冲孔间隙应略大于落料间隙。

2）冲小孔时（一般指孔径 d 小于料厚 t）冲孔凸模易折断，间隙应大些，但这时要采取有效措施防止废料回升。

3）硬质合金的冲裁模应比钢的间隙大 30%左右。

4）复合模的凸凹模模壁单薄时，为了防止胀裂，应放大冲孔凹模间隙。

5）冲裁硅钢片时，随硅钢片含硅量的增加，间隙应相应增加。

6）采用弹性卸料装置时，间隙应该取大些。

7）高速冲裁时，模具容易发热，间隙应增大。如果行程次数超过 200 次/min 时，间隙应增大 10%左右。

8）电火花加工凹模型孔时，其间隙应比磨削加工取小些。

9）加热冲裁时，间隙应减小。

10）凹模为斜壁刃口时，间隙应取小些。

综上所述，确定冲裁间隙的要领可归纳为一句话：按质定隙，分清主、次，酌情增、减，综合选定，最终实现技术和经济效果的统一。

3.4 常用间隙表

推荐两个冲裁间隙表，其中表 3.2-12 所列为较小的间隙值，适用于电子、仪器、仪表、精密机械等对冲裁件尺寸精度要求较高的行业，表 3.2-13 所列为较大的间隙值，适用于汽车、农机、起重运输等一般机械行业。

凸模、凹模的制造偏差和使用过程中的磨损均会使模具间隙变大，因此新模具的初始间隙应取最小合理间隙，用 c_{min} 表示。

表 3.2-12 和表 3.2-13 中初始间隙的最小值 c_{min} 相当于间隙的公称数值，初始间隙的最大值 c_{max} 是考虑到凸模和凹模的制造偏差所增加的数值。

使用过程中，模具凸、凹模刃口磨损将使间隙增大，一直增大到影响冲件质量需要刃磨时的最大间隙，使用中的最大间隙远大于两表中的 c_{max} 值，两者具有不同的概念。

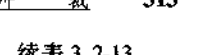
表 3.2-12　冲裁模初始单面间隙 c　　mm

材料厚度	软铝		纯铜、黄铜、软钢 (0.08～0.2)% t		杜拉铝、中硬钢 (0.3～0.4)% t		硬钢 (0.5～0.6)% t	
	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}
0.2	0.004	0.006	0.005	0.007	0.006	0.008	0.007	0.009
0.3	0.006	0.009	0.008	0.010	0.009	0.012	0.010	0.013
0.4	0.008	0.012	0.010	0.014	0.012	0.016	0.014	0.018
0.5	0.010	0.015	0.012	0.018	0.015	0.020	0.018	0.022
0.6	0.012	0.018	0.015	0.021	0.018	0.024	0.021	0.027
0.7	0.014	0.021	0.018	0.024	0.021	0.028	0.024	0.031
0.8	0.016	0.024	0.020	0.028	0.024	0.032	0.028	0.036
0.9	0.018	0.027	0.022	0.031	0.027	0.036	0.031	0.040
1.0	0.020	0.030	0.025	0.035	0.030	0.040	0.035	0.045
1.2	0.025	0.042	0.036	0.048	0.042	0.054	0.048	0.060
1.5	0.038	0.052	0.045	0.060	0.052	0.068	0.060	0.075
1.8	0.045	0.063	0.054	0.072	0.063	0.081	0.072	0.090
2.0	0.050	0.070	0.060	0.080	0.070	0.090	0.080	0.100
2.2	0.066	0.088	0.077	0.099	0.088	0.110	0.099	0.121
2.5	0.075	0.100	0.088	0.112	0.100	0.125	0.112	0.138
2.8	0.084	0.112	0.098	0.126	0.112	0.140	0.126	0.154
3.0	0.090	0.120	0.105	0.135	0.120	0.150	0.135	0.165
3.5	0.122	0.158	0.140	0.175	0.158	0.192	0.175	0.210
4.0	0.140	0.180	0.160	0.200	0.180	0.220	0.200	0.240
4.5	0.158	0.202	0.180	0.225	0.202	0.245	0.225	0.270
5.0	0.175	0.225	0.200	0.250	0.225	0.275	0.250	0.300
6.0	0.240	0.300	0.270	0.330	0.300	0.360	0.330	0.390
7.0	0.280	0.350	0.315	0.385	0.350	0.420	0.385	0.455
8.0	0.360	0.440	0.400	0.480	0.440	0.520	0.480	0.560
9.0	0.435	0.495	0.450	0.540	0.495	0.585	0.540	0.630
10.0	0.450	0.550	0.500	0.600	0.550	0.650	0.600	0.700

注：1. 初始间隙的最小值相当于间隙的公称数值。
　　2. 初始间隙的最大值是考虑到凸模和凹模的制造公差所增加的数值。
　　3. 在使用过程中，由于模具工作部分的磨损，间隙将有所增加，因而间隙的使用最大数值要超过表列数值。

表 3.2-13　冲裁模初始单面间隙　　mm

材料厚度	08、10、35 09Mn、Q235、B3		Q345		40、50		65Mn	
	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}
小于 0.5	极小间隙							
0.5	0.020	0.030	0.020	0.030	0.020	0.030	0.020	0.030
0.6	0.024	0.036	0.024	0.036	0.024	0.036	0.024	0.036
0.7	0.032	0.046	0.032	0.046	0.032	0.046	0.032	0.046
0.8	0.036	0.052	0.036	0.052	0.036	0.052	0.032	0.046
0.9	0.045	0.063	0.045	0.063	0.045	0.063	0.045	0.063
1.0	0.050	0.070	0.050	0.070	0.050	0.070	0.045	0.063
1.2	0.063	0.090	0.066	0.090	0.066	0.090		



续表 3.2-13

材料厚度	08、10、35 09Mn、Q235、B3		Q345		40、50		65Mn	
	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}	c_{min}	c_{max}
小于0.5	极小间隙							
1.5	0.066	0.120	0.085	0.120	0.085	0.120		
1.75	0.110	0.160	0.110	0.160	0.110	0.160		
2.0	0.123	0.180	0.130	0.190	0.130	0.190		
2.1	0.130	0.190	0.140	0.200	0.140	0.200		
2.5	0.180	0.250	0.190	0.270	0.190	0.270		
2.75	0.200	0.280	0.210	0.300	0.210	0.300		
3.0	0.230	0.320	0.240	0.330	0.240	0.330		
3.5	0.270	0.370	0.290	0.390	0.290	0.390		
4.0	0.320	0.440	0.340	0.460	0.340	0.460		
4.5	0.360	0.500	0.340	0.480	0.390	0.520		
5.5	0.470	0.640	0.390	0.550	0.490	0.660		
6.0	0.540	0.720	0.420	0.600	0.570	0.750		
6.5			0.470	0.650				
8.0			0.600	0.840				

注：冲裁皮革、石棉和纸板时，间隙取08号钢的25%。

4 冲裁凸、凹模工作部分尺寸设计

4.1 凸、凹模尺寸计算原则

凸、凹模刃口尺寸和公差的确定，直接影响冲裁件生产的技术经济效果，是冲裁模设计的重要环节，必须根据冲裁的变形规律，凸、凹模的磨损规律和经济的合理性综合考虑，遵循以下原则。

1）设计落料模时，应以凹模尺寸为基准，间隙取在凸模上，靠减小其尺寸获得。

2）根据冲模的磨损规律，凹模的磨损使落料件轮廓尺寸增大，因此设计落料模时，凹模的刃口尺寸应等于或接近工件的下极限尺寸；凸模的磨损使冲孔件的孔径尺寸减少，因此设计冲孔模时，凸模的刃口尺寸应等于或接近工件的上极限尺寸。

3）冲裁模在使用中，由于磨损间隙将不断增大，因此设计时无论是落料模还是冲孔模，新模具都必须选取最小合理间隙 c_{min}，使模具具有较长的寿命。

4）根据工件尺寸公差的要求，确定模具刃口尺寸的公差等级，如表3.2-14所示。

表 3.2-14 模具公差和工件公差的关系

料厚 t/mm ／ 工件公差 ／ 模具公差	0.5	0.8	1.0	1.5	2	3	4	5	6	8	10	12
IT6~7	IT8	IT8	IT9	IT10	IT10	—	—	—	—	—	—	—
IT7~8	—	IT9	IT10	IT10	IT12	IT12	IT12	—	—	—	—	—
IT9	—	—	—	IT12	IT12	IT12	IT12	IT12	IT14	IT14	IT14	IT14

4.2 凸、凹模分开加工时其尺寸与公差的确定

凸模和凹模的加工分为分开加工和配合加工两种方式。

凸模和凹模分开加工时，需要分别计算和标注凸模和凹模的尺寸和公差。

落料时，间隙取在凸模上，则凹模尺寸：

$$D_d = (D - x\Delta)^{+\delta_d}_{0}$$

凸模尺寸：

$$D_p = (D - x\Delta - 2c_{min})^{0}_{-\delta_p}$$

冲孔时，间隙取在凹模上，则凸模尺寸：

$$d_p = (d + x\Delta)^{0}_{-\delta_p}$$

凹模尺寸：

$$d_d = (d + x\Delta + 2c_{min})^{+\delta_d}_{0}$$

式中，D_d、D_p 分别为落料凹模和凸模的刃口尺寸，mm；d_p、d_d 分别为冲孔凸模和凹模的刃口尺寸，mm；D、d 分别为落料件外径和冲孔件孔径的基本尺寸；δ_d、δ_p 分别为凹模和凸模的制造公差；x 为系数，见4.3节；Δ 为工件的公差，mm；c_{min} 为最小合理单面间隙，mm。

落料和冲孔时刃口部分各尺寸关联图示于图 3.2-14。图中 δ_m 表示允许磨损量。

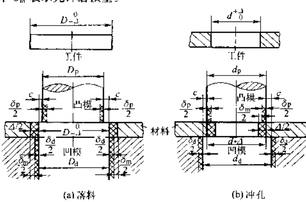


图 3.2-14 刃口部分各尺寸关联图

为了保证新模具的间隙小于最大合理单面间隙（c_{max}），凸模和凹模的制造公差必须满足以下条件：

$$|\delta_p| + |\delta_d| \leqslant 2\ (c_{0max} - c_{min})$$

4.3 凸、凹模配合加工时其尺寸与公差的确定

所谓配合加工就是在凸模和凹模中选定一件为基准件，制造好后用它的实际尺寸来配做另一件，使它们之间达到最小合理间隙值。落料时，先做凹模，以它为基准件配作凸模，保证最小的合理间隙值；冲孔时，先做凸模，以它为基准件配作凹模，保证最小的合理间隙。因此凸模和凹模配合加工时，只需在基准件上标注尺寸和公差，而在另一件上注明"刃口尺寸按凹模（或凸模）配作，保证单面间隙××"即可。

图 3.2-15 为落料件和凹模尺寸。凹模磨损后落料件分为三类：A 类尺寸增大，B 类尺寸减小，C 类尺寸不变。

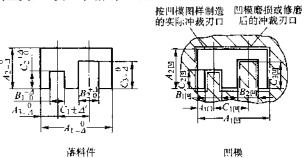


图 3.2-15 落料件及凹模尺寸

图 3.2-16 为冲孔件和凸模尺寸。随着凸模的磨损冲孔件也分为三类：A 类尺寸增大，B 类尺寸减小，C 类尺寸不变。所以对于复杂形状的落料件或冲孔件，其基准件的刃口尺寸均可按以下三式计算：

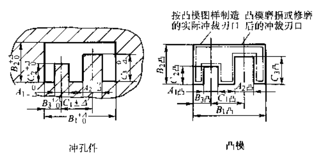


图 3.2-16 冲孔件和凸模尺寸

1）磨损后尺寸增大 $A_i = (A_{max} - x\Delta)_0^{+\delta_i}$

2）磨损后尺寸减小 $B_i = (B_{min} + x\Delta)_{-\delta_i}^{0}$

3）磨损后尺寸不变 $C_i = (C_{min} + 0.5\Delta)_{-\delta_i}^{+\delta_i}$

式中，i 为基准件代号（凹模为 d，凸模为 p）；A_i、B_i、C_i 为基准件尺寸，mm；A_{max}、B_{min}、C_{min} 为相应的工件极限尺寸，mm；Δ 为工件公差，mm；x 为系数，取系数 x 是为了使冲裁件的实际尺寸尽量接近冲裁件公差带的中间尺寸。工件公差等级为 IT10 或更高取 $x = 1$；工件公差等级为 IT11～IT13，取 $x = 0.75$；工件公差等级为 IT14，取 $x = 0.5$；δ_i 为模具制造公差。

分析表明，无论是分开加工法还是配合加工法，基准件（凸模或凹模）尺寸和公差的计算均可用以上三个公式。

4.4 数控线切割编程时凸、凹模尺寸的确定

数控线切割是在凸、凹模已经淬硬的情况下对模具进行线切割加工的，技术经济效果十分显著，是当前企业最广泛采用的冲裁模具加工方法。

数控线切割改变了以前认为凸、凹模分开加工只能针对圆形、方形等简单形状，复杂形状的零件凸、凹模刃口必须采取配合加工的状况。现在任何复杂形状的零件，均可采用数控线切割分别加工出凸模和凹模，冲出复杂轮廓的零件。例如小模数片齿轮等零件。

数控线切割编程过程：先根据基准件（凹模或凸模）的尺寸编制线切割程序，其配对件（凸模或凹模）和相关件（卸料板或压边圈、顶件板或反压板等）不再另外编程，可利用编程软件的功能，只需在基准件程序的基础上分别输入相应的间隙数值和取向，即可获得上述各件的线切割程序。从上述编程看，凸、凹模线切割似乎是配作的过程，但实际上，凸模和凹模均是按照各自的程序分开线切割加工的。当然，此时线切割设备的精度必须满足 $\delta_p + \delta_d < 2\ (c_{max} - c_{min})$ 条件，换言之，只要满足上述条件，采取以上编程过程，线切割设备就能分别线切割出所需任何复杂形状的凸、凹模，并可实现模具的互换。

几种主要的线切割机床加工精度列于表 3.2-15。

表 3.2-15 数控线切割机床加工精度 mm

走丝速度	慢走丝	快走丝
精度	0.004 0.006	0.01 0.015 0.017

高精度电火花、慢走丝线切割、数控点位坐标座和连续轨迹坐标磨等先进模具加工设备，加工精度均为 10^{-6} mm 级。用这些设备加工的模具绝大多数均可实现互换，这在大批量生产中具有重要意义。

目前许多企业均采用加工精度 0.015 mm 的快走丝线切割机床，根据凸、凹模可分开加工的条件 $\delta_p + \delta_d < 2\ (c_{max} - c_{min})$，即 $0.03 < 2\ (c_{max} - c_{min})$，从表 3.2-12 和表 3.2-13 可以发现，工件厚度超过 1.5 mm 和 1 mm 以后，上述精度为 0.015 mm 的线切割机床均可对其凸模和凹模实施分开加工。并可实现互换。

对于工件厚度较薄的模具，$\delta_p + \delta_d = 0.03 > 2\ (c_{max} - c_{min})$ 时，同样需要采取配作的方法，即基准件完成线切割后，需用万能测量仪（或其他设备）测出基准件的实际尺寸，再按此实际尺寸配间隙编程，实施对另一模具的配作。

总之，需根据现有设备的加工精度，和加工模具需控制

的间隙范围。通过判式 $\delta_p + \delta_d < 2\ (c_{max} - c_{min})$ 来确定凸模和凹模加工的方式。

5 冲裁力的计算

5.1 冲裁力的计算方法

冲裁力 F_0 的大小取决于冲裁内外周边的总长度、材料的厚度和抗拉强度，并和材料的屈强比有关，可按下式计算：

$$F_0 = fLt\sigma_b$$

式中，f 为系数，取决于材料的屈强比，可从图 3.2-17 求得，一般 f 为 0.6～0.7；L 为冲裁内外周边的总长，mm；t 为材料厚度，mm；σ_b 为材料的抗拉强度，MPa。

上述计算方法由 Timmerbeil 提出，$f = 1 - \frac{t'}{t}$，t' 为出现最大冲裁力（即上述计算式中冲裁力 F_0）时凸模压入材料的深度，它和材料的屈强比有关。采用上述公式计算的冲裁力，比较符合实际，被纳入了德国标准。另外，原材料提供的机械性能均包括材料的抗拉强度 σ_b 和屈服强度 σ_s，用它们的比值从图 3.2-17 中求得 f，进而可算出冲裁力，使用方便。

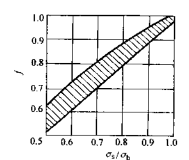


图 3.2-17 f 与材料屈强比的关系

5.2 减小冲裁力的方法

在冲裁高强度材料、厚料或大尺寸工件时，冲裁力如果超过现有设备吨位，需采取措施降低冲裁力，可采取以下方法。

（1）波形刃口

波形刃口冲裁时，材料是逐步分离的，可以减少冲裁力和冲裁时的振动和噪声。其结构应对称分布，避免冲裁时产生使凸、凹模偏移的侧向力，啃坏刃口。为了获得平整的工件，落料时，凸模应做成平刃，凹模做成波刃，见图 3.2-18a、b、c。冲孔时，凹模应做成平刃，凸模做成波刃，见图 3.2-18d、e、f。这样冲出的工件平整而废料弯曲。

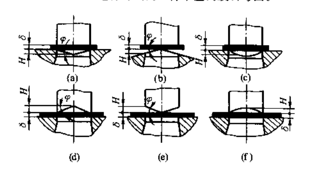


图 3.2-18 波刃结构

对于大型的拼块结构冲裁模，每个拼块的波形均应对称分布，如图 3.2-19 所示。

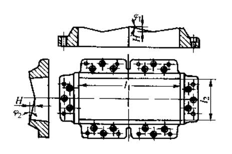


图 3.2-19 大型波刃冲裁模

波形刃口冲裁力 F_b 可按下式计算，减力程度与波峰高度 h，波角 φ 有关，即

$$F_b = KF_0$$

式中，K 为减力系数，见表 3.2-16；F_0 为平刃口冲裁力，N。

表 3.2-16 波刃参数

t/mm	h/mm	φ/(°)	K
<3	2t	<5	0.5～0.3
3～10	t	<8	0.6～0.5

虽然波刃冲裁模可以降低冲裁力，但却增加了模具制造困难，刃口也易磨损，应慎用。一般仅用于大型工件及厚板冲裁现有压力机吨位不够时。

（2）阶梯凸模

在多凸模冲裁中，将凸模做成不同的高度，可使各凸模不同时接触材料，避免各凸模最大冲裁力同时出现，达到降低冲裁力的目的。阶梯结构凸模如图 3.2-20 所示，它的冲裁力按相同高度凸模的最大冲裁力之和来计算。

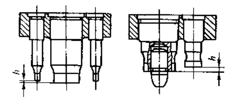


图 3.2-20 阶梯结构凸模

设计这种冲裁模时应考虑：

1）各阶梯凸模的分布应注意对称，使其合力接近压力中心。

2）应使带有导正销的凸模首先工作。

3）应使粗大的凸模高度最高，最先工作，细小的凸模高度最矮，最后工作，避免细小凸模失稳或受侧压折断。

4）凸模高度差 h 与材料的抗拉强度有关，可按表 3.2-17 选取。

表 3.2-17 凸模高度差 h 与材料抗拉强度 σ_b 的关系

σb/MPa	h	σb/MPa	h
<200	0.8t	>300	0.4t
200～300	0.6t		

5.3 卸料力、推件力和顶件力计算

冲裁结束后，将工件或废料从凸模上卸下的力为卸料力 F_1；将工件或废料从凹模内顺冲裁方向推出的力为推件力 F_2；逆冲裁方向将工件或废料从凹模洞口顶出的力为顶出力 F_3；分别按以下公式计算：

$$F_1 = k_1 F_0$$
$$F_2 = nk_2 F_0$$
$$F_3 = k_3 F_0$$
$$n = \frac{h}{t}$$

式中，F_0 为冲裁力，N；n 为同时卡在凹模内的工件或废料数；t 为料厚，mm；h 为凹模洞口直壁高度，mm；k_1、k_2、k_3 分别为卸料力、推件力、顶件力系数，按表 3.2-18 选取。

表 3.2-18　卸料力、推件力和顶件力系数

材料	t/mm	k_1	k_2	k_3
钢	≤0.1	0.065～0.075	0.1	0.14
	>0.1～0.5	0.045～0.055	0.065	0.08
	>0.5～2.5	0.04～0.05	0.055	0.06
	>2.5～6.5	0.03～0.04	0.045	0.05
	>6.5	0.02～0.03	0.025	0.03
铝、铝合金		0.025～0.08	0.03～0.07	0.03～0.07
纯铜、黄铜		0.02～0.06	0.03～0.09	0.03～0.09

注：在冲多孔、大搭边和轮廓复杂时 k_1 取上限。

计算冲裁所需总压力时，需根据模具卸料顶件结构形式，考虑是否和冲裁力叠加。一般除刚性顶件力、刚性卸料力不与叠加外，其他推件力、弹性顶件力和弹性卸料力均应和冲裁力叠加。

6　材料利用率

6.1　排样及材料的利用率

(1) 材料利用率的计算

在冲压生产中，随着冲压技术的发展和工效的提高，工件的成本中多项费用均相应降低，惟有材料费保持不变，因而出现随着冲压技术的进步，工件成本中材料费用所占比重日益增加的现象，因此在现代冲压技术中，提高工件的材料利用率对于降低生产成本具有重要的意义。

所谓材料利用率 η 是指工件的实际面积 F_0 与所耗材料面积 F 之比值，即

$$\eta = F_0/F \times 100\%$$

一张板料或一个条料上的材料利用率 $\eta_{总}$ 为：

$$\eta_{总} = \frac{n \times F_0}{A \times B} \times 100\%$$

式中，F_0 为工件的实际面积；n 为板（条）料上工件总数量；A 为板（条）料长度；B 为板（条）料宽度。

在实际生产中，需要进行经济活动分析时，材料利用率 $\eta_{实}$ 常用另一种方法计算。

$$\eta_{实} = \frac{n\,m}{M} \times 100\%$$

式中，n 为某时间段（月、季或年）内的生产总量；m 为工件的单件重量；M 为某时间段（月、季或年）内的材料消耗总重。

通过对 $\eta_{实}$、$\eta_{总}$ 和 η 数值的对比分析，确定排样方案是否合理。找出影响材料利用率的因素，寻求提高材料利用率的途径。

汽车行业冲压件的平均材料利用率为 65%～80%，仪表行业冲压件的平均材料利用率为 60%～65%。

生产纲领制定后，材料利用率 $\eta_{实}$ 还可以用来计算下一年度生产所需订购钢板的总量。

(2) 排样

冲裁件在条料上的布置方法叫排样。合理的排样应保证材料利用率高、模具结构简单、工件质量好、操作方便、生产率高。

1) 条料上的排样。排样按有、无废料可分为有搭边、少搭边和无搭边三种排样，按工件的外形特征又可分为直排、斜排、直对排、斜对排、混合排、多行排及裁搭边等形式。有搭边排样列于表 3.2-19、少、无搭边排样列于表 3.2-20。

表 3.2-19　有搭边排样

形式	简图	适用于
直排		几何形状简单的零件
斜排		T 形或其他复杂形状工件，这些工件直排时废料较多
直对排		T、冂、凵形工件，这些工件直排或斜排时废料较多
斜对排		T 形等工件，上述排样时废料较多
混合排		两种材料和厚度均相同的工件
多行排		大批量生产中轮廓尺寸较小的工件
裁搭边		大批量生产中，小而窄的工件

注：B 为料宽，h 为送料距。

表 3.2-20　少无搭边排样

形式	简图	适用于
直排		矩形工件
斜排		T 形或其他形状工件，允许外形有小缺陷

续表 3.2-20

形式	简图	适用于
直对排		梯形或其他形状工件
斜对排		T形或其他形状工件
混合排		两外形互相嵌入的工件
多行排		大量生产中尺寸较小的矩形、方形及六角形工件
裁搭边		用宽度公差符合要求的卷料或条料制造长形件

注：B 为料宽，h 为送料距。

2）板料上的排样。板料上排样应注意的事项如下。

① 注意板料轧制纤维方向，以防止弯曲工件的开裂。

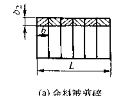
② 如果条料宽度就是工件的尺寸时，其所能达到的尺寸公差就是下料公差，可按表 3.2-21 确定。

表 3.2-21 斜刃剪板机下料公差 mm

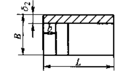
板 厚	宽 度				
	<50	50~100	100~150	150~220	220~300
<1	+0.2 -0.3	+0.2 -0.4	+0.3 -0.5	+0.3 -0.6	+0.4 -0.6
1~2	+0.2 -0.4	+0.2 -0.5	+0.3 -0.6	+0.4 -0.6	+0.4 -0.7
2~3	+0.3 -0.6	+0.4 -0.6	+0.4 -0.7	+0.5 -0.7	+0.5 -0.8
3~5	+0.4 -0.7	+0.5 -0.7	+0.5 -0.8	+0.6 -0.8	+0.6 -0.9

③ 手工送料时，条料的长度不宜超过 1~1.5 m。

④ 当余料尺寸较大又不可避免时，应尽可能保留完整的余料，如图 3.2-21 所示，供其他冲压件应用。



(a) 余料被剪碎



(b) 余料完整

图 3.2-21 板料上排样

⑤ 有时采用纵、横向综合下料的办法，可在一张板料上获得更多的工件。图 3.2-21 为单一的横向下料，每一条料上都剩下一块较大的余料，如果发现板料的宽度 B 是条料宽度 b 的整数倍而略有余量时（$B=nb$），可将板料沿长度方向横切成几段，每段长度 H 是送料距 h 的整数倍（$H=mh$），再将每块料纵向裁成 n 条。由于最后一块的长度不一定是送料距的整数倍，会留下余料。因此，采用此方案可获得的工件数还需和单一横向下料的排样方案作比较。以上仅是生产中的一个实例，纵、横向综合下料的方案还有许多，目的都是为了在一张板料上获得最多的工件。

（3）提高材料利用率的途径

合理的排样是提高材料利用率，节约材料的主要途径，它包括上述两表中各种典型的排样方案可供参考选用，还可采用计算机优化排样。除此以外，节材的另一途径可采取有效的技术组织措施，包括：

1）对工件进行结构工艺性审查，在不影响使用功能的前提下修改工件形状，满足合理排样，减少废料，如图 3.2-22 所示。

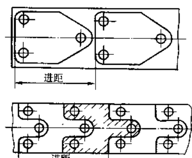


图 3.2-22 修改工件形状实例

2）充分利用废料，发掘排样潜力，加强废料管理。有些工件经合理排样，较大的工艺废料仍不可避免时，可采用混合排样，在相应部位冲出相同厚度的小工件，如图 3.2-23 所示。图 3.2-24 所示为套冲排样实例，利用大工件三个孔的结构废料，通过连续模套冲两种规格的垫圈。

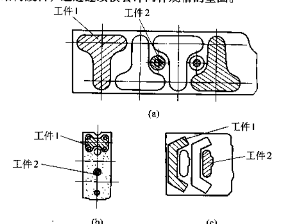
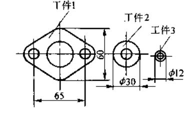


图 3.2-23 混合排样示例

在实际生产中，由于各种原因，限制了混合排样和套冲排样的采用。例如生产批量小、模具费用高，采用混排和套冲并不合算。因此生产中会出现大量可利用的废料，需加强管理分类收集，供将来其他工件之用，这也是节材的重要途径。

上面多次提到无搭边冲裁，它是节约材料的重要方法，但是搭边是保证工件质量所需要的，（搭边的作用详见 6.2 小节介绍）因此采取无搭边冲裁将有可能增加生产过程的废品率。为此在采用无搭边冲裁方案时，必须加强生产过程的质量控制。经常检查下料设备和送料装置的精度，定期进行



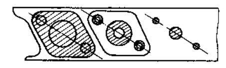


图 3.2-24　三个零件套冲

产品质量统计和废品原因分析，必要时需按第（1）小节中给出的实际材料利用率 $\eta_{实}$ 的计算方法，算出 $\eta_{实}$，然后和设计的无搭边冲裁排样的材料利用率 $\eta_{总}$ 进行比较，如果二者接近，表明采用无搭边冲裁方案是成功的；反之，如果二者相差较大，表明废品率高，需要查明原因，采取相应的技术组织措施。总之，采用无搭边冲裁方案应该慎重，除了看到它的节材优点以外，还应看到它的产品质量差，模具寿命低，容易出现废品等不足之处。

6.2　搭边

在条料上冲裁时，工件之间以及工件和条料侧边之间的余料称为搭边。搭边的作用是补偿送料误差，保证冲出合格工件，保持条料刚度便于送料。搭边值应该合理，搭边值过小，冲裁时可能被拉入凸、凹模间隙中形成毛刺，产生的侧向力还会损坏模具。一般厚度小于1 mm的材料，搭边值的选取主要考虑送料时有足够的刚性，搭边值为1～2 mm。厚度大于1 mm的材料，搭边值按1个料厚左右选取，主要是考虑冲裁时沿凸模刃口周边受力均匀，保证工件质量和模具寿命。

机械行业标准 JB/T 9176—1999 推荐的普通钢板合理搭边值示于表 3.2-22，其他材料需乘系数 k_{yd}，见表 3.2-23。

表 3.2-22 适于较大的工件，表 3.2-24 适于中小工件。

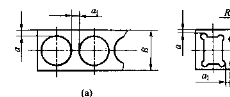
表 3.2-22　普通钢板冲裁的合理搭边　　mm

材料厚度		圆形		非圆形						往复送料		自动送料	
				$l<100$		$l>100\sim200$		$l<200\sim300$					
大于	至	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1	a	a_1
0	0.5	2.0	1.5	2.5	2.0	3.0	2.5	3.5	3.0	3.5	3.0	3.0	2.0
0.5	1	2.0	1.5	2.5	2.0	2.5	2.0	3.0	2.5	3.0	2.0	3.0	2.0
1	2	2.0	1.5	2.5	2.0	2.5	2.0	3.0	2.5	3.5	3.0	3.0	2.0
2	3	2.5	2.0	3.5	3.0	4.0	3.0	3.5	3.0	4.0	3.5	3.0	2.0
3	4	3.0	2.5	4.0	3.5	4.0	3.5	4.5	4.0	5.0	4.0	4.0	3.0
4	5	4.0	3.0	5.0	4.0	5.0	4.0	5.5	4.5	6.0	5.0	5.0	4.0
5	6	4.5	3.5	5.5	4.5	5.5	4.5	6.0	5.0	7.0	6.0	6.0	5.0
6	8	6.0	5.0	6.0	5.0	6.0	5.0	6.5	5.5	8.0	7.0	7.0	6.0
8		7.0	6.0	8.0	7.0	9.0	8.0	9.0	8.0	9.0	8.0	8.0	7.0

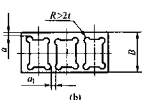
表 3.2-23　系数 k_{yd}

材料名称	系数 k_{yd}	材料名称	系数 k_{yd}	材料名称	系数 k_{yd}
高碳硬钢板	0.8	黄　铜　板	1.2	铝　　板	1.5
中碳半硬钢板	0.9	纯铜板	1.4	纸　　板	1.5～2.0

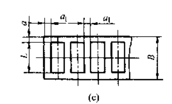
表 3.2-24　合理搭边值　　mm



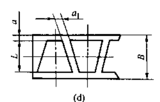
(a)



(b)



(c)



(d)

续表 3.2-24

卸料板型式	条料厚度 t /mm	搭边值/mm					
		用于图a、b，$R>2t$		用于图c、d，$L\leq50$		用于图c、d，$L>50$	
		a	a_1	a	a_1	a	a_1
弹性卸料板	~0.25	1.2	1.0	1.5	1.2	1.8~2.6	1.5~2.5
	>0.25~0.5	1.0	0.8	1.2	1.0	1.5~2.5	1.2~2.2
	>0.5~1.0					1.8~2.6	1.5~2.5
	>1.0~1.5	1.3	1.0	1.5	1.2	2.2~3.2	1.8~2.8
	>1.5~2.0	1.5	1.2	1.8	1.5	2.4~3.4	2.0~3.0
	>2.0~2.5	1.9	1.5	2.2	1.8	2.7~3.7	2.2~3.2
	>2.5~3.0	2.2	1.8	2.4	2.0	3.0~4.0	2.5~3.5
	>3.0~3.5	2.5	2.0	2.7	2.2	3.3~4.3	2.8~3.8
	>3.5~4.0	2.7	2.2	3.0	2.5	3.5~4.5	3.0~4.0
	>4.0~5.0	3.0	2.5	3.5	3.0	4.0~5.0	3.5~4.5
	>5.0~12	$0.6t$	$0.5t$	$0.7t$	$0.6t$	(0.8~1) t	(0.7~0.9) t
固定卸料板	~0.25	1.5	1.2	2.2	1.8	2.2~3.2	
	>0.25~0.5	1.2	1.0	2.0	1.5	2.0~3.0	
	>0.5~1.0	1.0	0.8	1.5	1.2	1.5~2.5	
	>1.0~1.5	1.2	1.0	1.8	1.2	1.8~2.8	
	>1.5~2.0	1.5	1.2	2.0	1.5	2.0~3.0	
	>2.0~2.5	1.8	1.5	2.2	1.8	2.2~3.2	
	>2.5~3.0	2.0	1.8	2.5	2.2	2.5~3.5	
	>3.0~3.5	2.2	2.0	2.8	2.5	2.8~3.8	
	>3.5~4.0	2.5	2.2	3.0	2.8	3.0~4.0	
	>4.0~5.0	2.8	2.5	3.5	3.0	3.5 ~4.5	
	>5.0~12	$0.6t$	$0.5t$	$0.7t$	$0.6t$	(0.75~0.9) t	

注：1. 直边冲件（图c、d），其长度 L 在 50~100 mm 内，a 取较小值；L 在 100~200 mm 内 a 取中间值；L 在 200~300 mm内，a 取较大值。
2. 正反面冲的条料，宽度 B 大于 50 mm 时，a 取较大值。
3. 对于硬纸板、硬橡皮、纸胶板等材料以及自动送料的冲裁件，应按表列的数值乘以系数 1.3。
4. t 为冲裁件的料厚。

6.3 条料宽度及导尺间距离的确定

条料宽度及导尺间距离的确定与是否采用侧压装置或侧刃有关。

（1）有侧压装置（图 3.2-25）

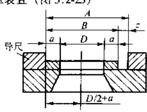


图 3.2-25 有侧压冲裁模

条料宽度：$B_{-\Delta}^{\ 0}=(D+2a+\Delta)_{-\Delta}^{\ 0}$

导尺间距离：$A=B+Z$

$=D+2a+\Delta+Z$

（2）无侧压装置（图 3.2-26）

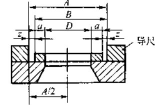


图 3.2-26 无侧压冲裁模

条料宽度：$B_{-\Delta}^{\ 0}=[D+2(a+\Delta)]_{-\Delta}^{\ 0}$

导尺间距离：$A=B+2Z$

$=D+2(a+\Delta+Z)$

式中，B 为条料宽度的基本尺寸，mm；D 为垂直于送料方向的工件最大尺寸，mm；a 为侧搭边值，mm；Z 为条料与导尺间的最小间隙，mm，列于表 3.2-25；Δ 为条料宽度的单向极限偏差，mm。

表 3.2-25 送料最小间隙 Z　　mm

条料导向方式 / 条料宽度 / 材料厚度	无侧压装置			有侧压装置	
	100 以下	100~200	200~300	100 以下	100 以上
~0.5	0.5	0.5	1	5	8
0.5~1	0.5	0.5	1	5	8
1~2	0.5	1	1	5	8
2~3	0.5	1	1	5	8
3~4	0.5	1	1	5	8
4~5	0.5	1	1	5	8

（3）有侧刃（图 3.2-27）

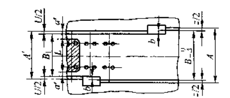


图 3.2-27 有侧刃的冲裁模



条料宽度：$B_{-\Delta}^{\ 0} = (L+2a'+nb)_{-\Delta}^{\ 0}$

$$= (L+1.5a+nb)_{-\Delta}^{\ 0} \quad (a'=0.75a)$$

导尺间距离：

$$A = L+1.5a+nb+Z$$

$$A' = L+1.5a+y$$

式中，L 为垂直于送料方向的工件尺寸，mm；n 为侧刃数；b 为侧刃裁切的条边宽度，mm，列于表 3.2-26；y 为冲切后的条料宽度与导尺间的间隙，mm，列于表 3.2-26。

表 3.2-26　b、y 值　　mm

条料厚度 t	b		y
	金属材料	非金属材料	
~1.5	1.5	2	0.10
>1.5~2.5	2	3	0.15
>2.5~3	2.5	4	0.20

7　冲裁模分类及典型结构

冲裁模按工艺分为落料模、冲孔模、切边模、剖切模、切口模和切断模；按工艺的组合分为单工序冲裁模，复合冲裁模和连续冲裁模。它们之间的比较列于表 3.2-27，可供确定模具结构方案时参考。

各类冲裁模典型结构分别如下所示。

表 3.2-27　单工序模、复合模和连续模综合比较

比较项目	单工序模	复合模	连续模
冲压精度	较低	较高	一般
冲压生产率	低，压力机一次行程内只能完成一次工序	较高，压力机一次行程内可完成二个以上工序	高，压力机一次行程内可完成多个工序
实现操作机械化，自动化的可能性	较易，尤其适合于多工位压力机上实现自动化	难，制件和废料排除较复杂，只能在单机上实现部分机械操作	容易，尤其适应于单机上实现自动化
生产通用性	好，适合于中小批量生产及大型零件的大量生产	较差，仅适合于大批量生产	较差，仅适合于中、小型零件的大批量生产
冲模制造的复杂性和价格	结构简单，制造周期短，价格低	复杂性和价格均较高	复杂性和价格都较高

7.1　落料模

落料模系沿封闭轮廓将工件与材料分离的模具。冲裁模一般都要求凸、凹模对中，间隙均匀，因此都采用带导柱导套的模架。图 3.2-28 和图 3.2-29 为这种结构的落料模。前者采用弹压卸料板卸料，后者采用固定卸料板卸料，并装有自动挡料销。对于后者，在自由状态下拉簧 2 使自动挡料销紧靠卸料板长槽的右下方，在条料送料力推动下逆时针旋转，靠紧卸料板长槽左侧实现挡料；在压力机滑块下行落料的过程中，顶杆 3 压下活动挡料销尾部使其绕轴 5 转动，头部抬起，高出废料搭边上表面，在拉簧 2 作用下绕销轴座 6 顺时针方向转动，完成对废料搭边的跨越，回到起始位置，准备下一次的挡料。

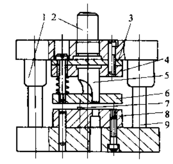


图 3.2-28　落料模（弹压卸料）

1—导套；2—模柄；3—垫板；4—凸模固定板；5—凸模；6—卸料板；7—定位板；8—凹模；9—导柱

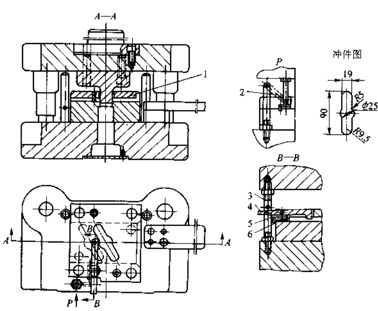


图 3.2-29　落料模（固定卸料板）

1—卸料板；2—拉簧；3—顶销；4—活动挡料销；5—销轴；6—销轴座



图3.2-30所示落料模是用于冲制带窄条或窄槽的零件。如图所示零件最窄处的宽度值仅为0.6 mm，料厚1.5 mm，宽度与料厚之比为1∶2.5，该处凸模十分脆弱，在结构上吸取了精冲模的办法，凸模6和压料导板11之间采用无松动精密滑配，确保凸模不受偏载和失稳。

图3.2-31和图3.2-32所示为采用导板导向的落料模。导板既用于凸模导向又用于固定卸料板，起卸料作用。结构简单，制造容易，线切割凹模时，只需附带将导板同时切出即可。用销钉定位保证导板和凹模对中，并选择合适的高度，使凸模在落料生产过程中不脱离导板。图3.2-32落料模还装有临时挡料销，用于条料的起始冲裁，提高材料的利用率。

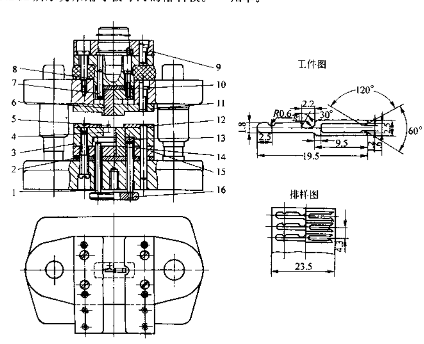


图3.2-30 窄条零件落料模

1—顶杆；2—下垫板；3—凹模；4—顶出板；5—定位板；6—凸模；7—上固定板；8—固定板；9—上模板；10—上垫板；11—压料导板；12—定位板；13—托板；14—镶块；15—下固定板；16—顶料杆

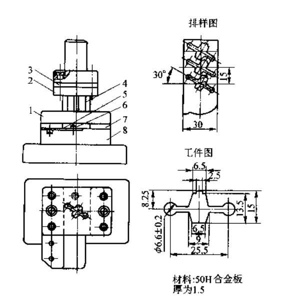


图3.2-31 导板导向落料模Ⅰ

1—导板；2—凸模固定板；3—垫板；4—凸模；5—托料板；6—定位销；7—侧面导板；8—凹模

7.2 冲孔模

图3.2-33和图3.2-34均为冲小孔的冲孔模，它们的共同特点是使冲孔小凸模尽可能短，因为细长的凸模和防护套加工困难，寿命比短凸模低。小凸模和导板间采用无松动滑配，小凸模露出导板的高度一般定为材料厚度加2～3 mm，另外在导板和小凸模间增加了小导柱导向，用它保护小凸模不受侧向力。

图3.2-35和图3.2-36均为侧孔冲模结构，图3.2-37所示为多向冲孔模结构。

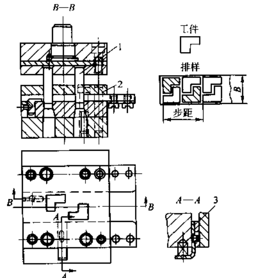


图3.2-32 导板导向落料模Ⅱ

1—凸模；2—导板；3—临时挡料销

7.3 切边模

图3.2-38所示为矩形拉深件凸缘切边模。

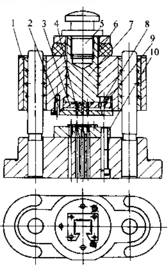


图 3.2-33　冲小孔模Ⅰ

1—上模座；2—导板；3—凸模固定板；4—冲小孔凸模；5—模柄；6—橡胶；7—接头；8—小导套；9—小导柱；10—凹模

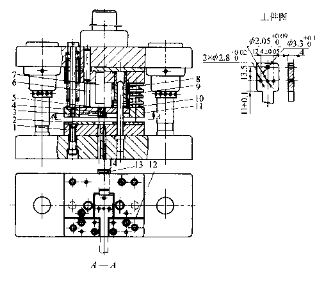


图 3.2-34　冲小孔模Ⅱ

1—凹模；2—定位板；3—凸模；4—凸模；5—凸模；6—螺钉；7—冲击板；8—小导套；9—小导柱；10—导板；11—卸料板；12—定位板；13—侧压板；14—簧片

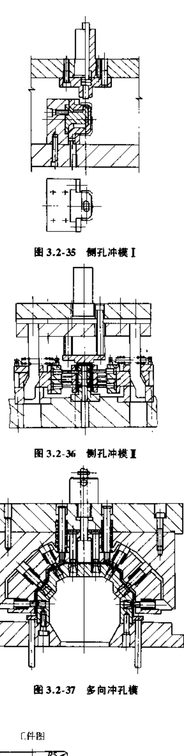
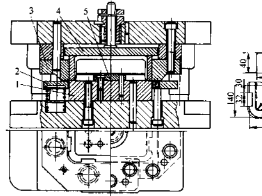


图 3.2-35　侧孔冲模Ⅰ

图 3.2-36　侧孔冲模Ⅱ

图 3.2-37　多向冲孔模



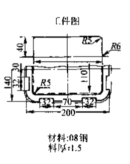


图 3.2-38　凸缘切边模

1—凸模；2—卸料板；3—凹模镶块；4—推件块；5—定位板



图3.2-39所示为浮动水平切边模。凸模10和浮动凹模8间的间隙由压杆11的高度来控制，在压杆11向下推动过程中，浮动凹模8按斜楔导轨1、4、5、7预向设定的顺序，绕模具几何中心顺时针或逆时针方向依次向四侧作水平移动，完成切边。

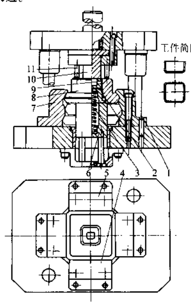
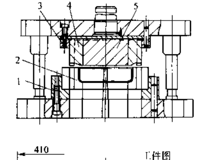


图3.2-39　浮动水平切边模
1、4、5、7—斜楔导轨；2—托圈；3—弹簧；6—弹簧座；8—浮动凹模；9—定位块；10—凸模；11—压杆

7.4　剖切模、切口模

图3.2-40所示为剖切模结构实例，将一个盒形件剖切成如图所示4个零件。凸模的4个斜刃先对工件的4个垂直侧壁进行剖切，最后冲裁工件的底部，完成对盒形拉深件的剖切。凸模和凹模采用镶拼式结构，便于制造。



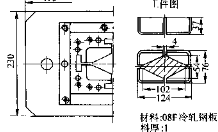


图3.2-40　剖切模Ⅰ
1—凹模固定板；2—凹模；3—凸模固定板；4—斜刃凸模；5—冲裁凸模

图3.2-41所示剖切模可将落料、拉深、切边、冲孔后的工件剖切成两个零件。凹模3由两件组成，刃口形状和工件截面处轮廓一致，间隙可用螺钉调节，组成贯通的长槽供切下的废料落下排出。

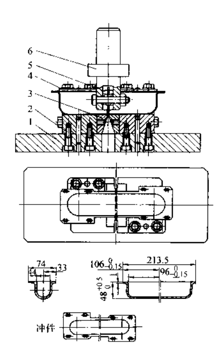


图3.2-41　剖切模Ⅱ
1—模座；2—凹模固定板；3—凹模；4—定位板；5—剖切模；6—模柄

切口模结构如图3.2-42所示。

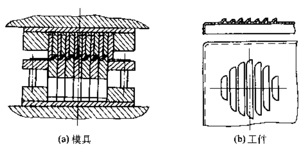


图3.2-42　切口模

7.5　复合冲裁模典型结构

图3.2-43所示为常见的冲孔落料复合模结构，采用弹性卸料、打杆打落废料，气垫顶出工件。

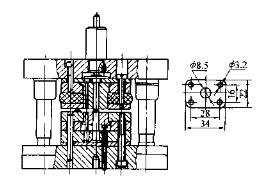


图3.2-43　冲孔落料复合模Ⅰ

图3.2-44所示为另一种常见的冲孔落料复合模结构。

以上两种冲裁复合模结构的主要区别是前者凸凹模在上，凹模在下，称为顺装；后者凸凹模在下、凹模在上，称为倒装。

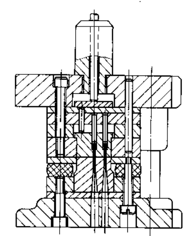


图 3.2-44　冲孔落料复合模Ⅱ

图 3.2-45 所示为多层套筒式复合冲裁模，一次冲压可获得 3 个工件。即上述排样中所述的套冲。凸凹模 2 壁上开 3 个长圆孔，连接销 16 将顶件套 3、4 连接在一起，同时完成顶件。

图 3.2-46 所示为无搭边多个冲孔落料复合模。一次冲压可获得 6 个相同的工件。料宽等于工件的宽度，用于工件外轮廓尺寸精度要求不高的情况。

7.6　连续冲裁模典型结构

连续模的主要特点是可分散工序，既能解决复合模中凸凹模的“最小壁厚”（强度）问题，又可通过多次冲孔获得轮廓截面窄小、落料凸模强度不够而无法冲裁的零件。

图 3.2-47 所示为采用导板导向的连续模。开始先用手按临时挡料销限定条料初始位置，进行冲孔，然后松开手临时挡料销在弹簧作用下回到原来位置，再将条料送进一个步距。先用固定挡料销初定位，在落料时用装置在凸模端面上的导正销进行精确定位。导正销和挡料销之间距离的公差取向，视挡料销定位侧面的方向而定，采用沿送料方向定位时，公差应取负值，导正销精确定位时材料可以后移，反之公差取正值，导正时条料可前移。总之，设计时应避免导正销精确定位使条料被拉长或压缩而引起孔的变形。

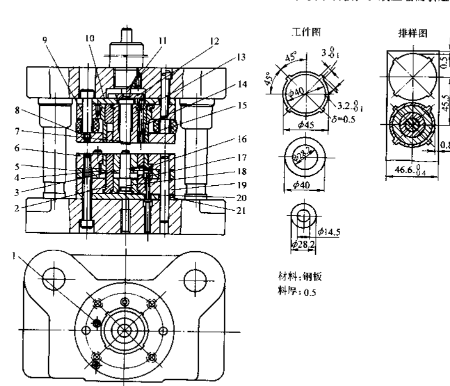


图 3.2-45　多层套筒式复合冲裁模

1—定位销；2、13、14—凸凹模；3、4—顶件套；5—中间垫板；6—凹模；7、11—打杆；8—卸料板；9—上凸模固定板；10—垫板；12—打板；15—打料板；16—连接销；17、19—凸模固定板；18—凸模；20—顶杆；21—下垫板

图 3.2-48 所示为采用侧刃定距的冲裁连续模。侧刃定距，送料精度高，条料送进过程不需抬起，操作方便，效率高，但材料消耗和冲裁力略有增加。

图 3.2-49 所示为采用自动挡料的冲裁连续模。自动挡料装置由挡料杆 1、冲搭边的凹模 2 和凸模 3 组成。工作时挡料杆始终不离开凹模的刃口平面，因此条料往左送进时即被挡料杆挡住。在冲裁的同时，凸模 3 将搭边冲出一个缺口，使条料不需抬料又可继续送进一个步距。实现自动挡料连续冲裁。起初两次冲裁分别由临时挡料销定位，从第三次冲裁开始用自动挡料装置定位。

图 3.2-50 所示为定、转子片冲裁连续模，第一步由冲孔凸模 1、2 冲出转子轴孔及槽，第二步由导正销 7 精定位。先由凸模 5，凸凹模 11 及凹模 3（凸模 4 镶在凹模 3 内）冲出定子槽及定子外圆，此时活动刃口 10 由碟形弹簧托住，作为冲定子槽的凹模刃口用，当上模继续下降，凸模 6 克服碟形弹簧 9 之力将活动刃口 10 向下压，定子内圆（即转子外圆）被分离。



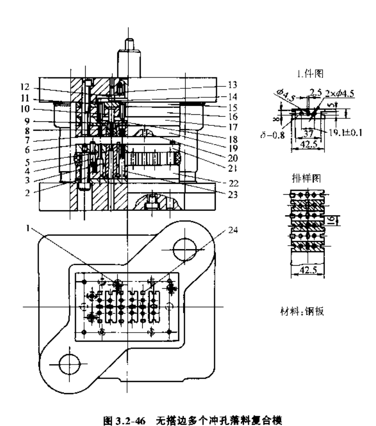


图 3.2-46 无搭边多个冲孔落料复合模

1—挡料钉；2—下垫板；3、5、10、23、24—凸模；4—弹簧；6—定位板；
7、8—打料块；9、20—打料杆；11、13—打杆；12—销钉；14、18—打板；15—上垫板；
16—上固定板；17—中间垫板；19—凹模；21—卸料板；22—下固定板

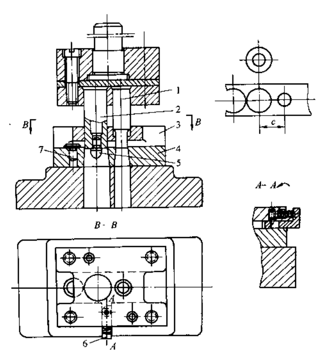


图 3.2-47 采用导板导向的连续冲裁模

1—冲孔凸模；2—落料凸模；3—导板；4—凹模；
5—导正销；6—临时挡料销；7—固定挡料销

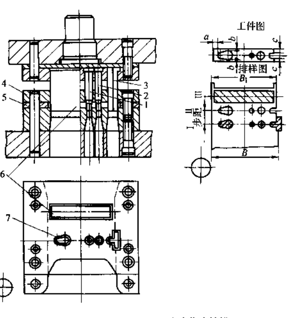


图 3.2-48 采用侧刃定距的冲裁连续模

Ⅰ—冲孔、切边；Ⅱ—空位；Ⅲ—落料；
1、2—冲孔凸模；3—侧刃；4—卸料板；5—导尺；
6—落料凸模；7—冲孔凸模

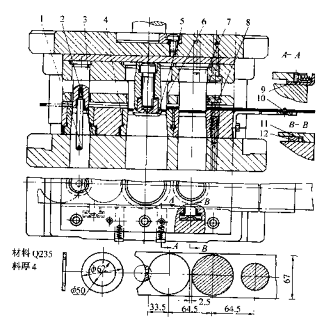


图 3.2-49 采用自动挡料的冲裁连续模

1—挡料杆；2、4、8—凹模；3、6、7—凸模；5—导正销；9—始用挡料销；10—螺钉；11—弹簧片；12—侧压块

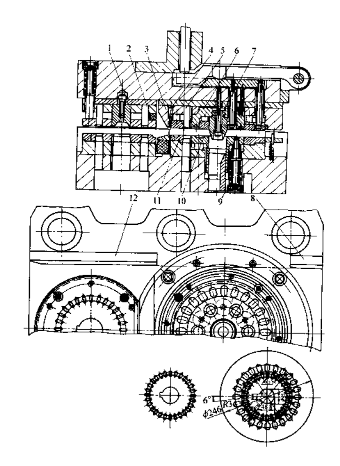
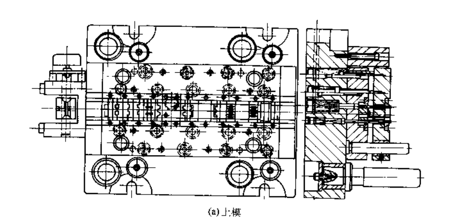


图 3.2-50 定、转子片冲裁连续模

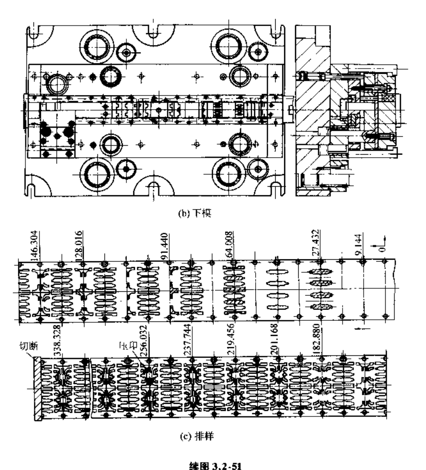
1、2、4、5、6—凸模；3—凹模；7—导正销；8、12—导料板；9—碟形弹簧；10—活动刃口；11—凸凹模

图 3.2-51 所示为引线框架冲裁连续模。其结构的主要特点是采用连续多次冲孔而获得引线框架件。如排样图所示，这是引线框架腿部细窄，直接采用落料工艺凸模强度不够所致。由于引线框架的部分轮廓系通过多次冲裁组合而成，因此要求模具的尺寸精度，定位精度极严。防止出现接缝毛刺而影响工件质量。模具导向和精冲模相同采取联合导向形式，即上、下模座间用 4 副滚动导柱、导套导向，凸模、凹模间用 4 副滑动小导柱、导套导向。前者为过盈滚动导向，确保上下模位置精确定位，后者系无间隙滑动导向，具有一定的导向刚性，冲裁过程中，出现侧向力时，保证上下模间不产生侧移。送料精度可达 ±0.05 mm，释料瞬间，通过设置的多个导正销进行精确定位，进距精度可达 ±0.003 mm。凸、凹模均采用钨钴类硬质合金制造，在高速冲床上完成多工位连续冲裁。引线框架是集成电路内部芯片和外部电器设备的导线和支撑结构件，在电子行业广泛采用，引线框架结构繁多，引出线的腿数从 8 到 108，数量各异，但生产用的冲裁连续模结构和图 3.2-51 所示均基本类同。



(a) 上模

图 3.2-51 双列 8 腿引线框架冲裁连续模



(b) 下模

(c) 排样

续图 3.2-51

8 冲裁模主要零件的设计及标准的选用

8.1 凸模及其固定方法

(1) 凸模结构形式

常见凸模结构形式如表 3.2-28 所示。

表 3.2-28 常见凸模结构形式

序号	简 图	说 明
1	装配后铆开磨平；D(M6)；0.1~0.2；l；L；l_1；d	适用于圆形凸模 d = 1 ~ 8 mm
2	压入后磨平；D_1；3；l；D(M6)；0.1~0.2；L；l_1；d	适用于圆形凸模 d = 1 ~ 15 mm

续表 3.2-28

序号	简 图	说 明
3	压入后磨平；D_1；3；0.5；D(M6)；l；L；d	适用于圆形凸模 d = 8 ~ 30 mm
4	5~8；>0.5	用于大尺寸零件。槽口定位，螺钉紧固。限定刃口长度，可减少端面和侧面刃磨面积
5	a；b	单面冲裁凸模，突起部分 a 用于平衡侧向力

续表 3.2-28

序号	简　图	说　明
6		异形：等截面凸模，端部用软铆接于凸模固定板。若截面较大，可用螺钉固定于凸模固定板，如表 3.2-29 简图 4 所示
7		整体剪裁凸模
8		镶拼剪裁凸模

(2) 凸模固定方式

常见凸模固定方式示于表 3.2-29。

表 3.2-29　常见凸模固定方式

序号	简　图	说　明
1		凸模 3 和凸模固定板 2 用过渡配合，由螺钉夹紧，销钉定位，紧固在模座 1 上 圆冲孔凸模都用这种方式固定
2		等截面凸模，端部回火后铆接在凸模固定板上磨平
3		等截面凸模，上端开孔插人圆销以承受卸料力
4		等截面凸模，当截面较大时，可直接用螺钉紧固在凸模固定板上

续表 3.2-29

序号	简　图	说　明
5		快速更换凸模。拧松螺钉即可更换凸模
6		拧松螺钉即可更换凸模
7		小凸模靠卸料板 2 精确定位导向，同时起保护作用，凸模固定板 1 只承受卸料力
8		大尺寸落料凸模，通过螺钉压紧销钉定位，并紧固于模座上
9		环氧树脂定位，螺钉承受卸料力
10		凸模固定板定位，环氧树脂结构承受卸料力

(3) 凸模计算

1) 凸模长度计算。应尽可能选用标准长度的凸模，以利于降低制造成本和缩短制模周期。一般先根据模具结构初步拟定一个尺寸，然后再在凸模标准长度中选定一个和初步拟定尺寸接近的作为凸模长度，可以直接选用标准凸模。

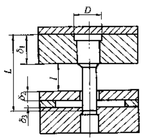


图 3.2-52　凸度长度的确定

如果初步拟定的尺寸和凸模标准尺寸相差甚远，则需采

用非标尺寸，如图 3.2-52 所示。凸模的长度 L 为

$$L=\delta_1+\delta_2+\delta_3+l$$

式中，δ_1 为凸模固定板长度；δ_2 为卸料板厚度；δ_3 为导尺厚度；l 为附加长度，它包括凸模固定板与卸料板之间的安全距离，凸模进入凹板的深度及凸模的修容量，一般取 $l=$ 15～20 mm。

2）凸模强度计算。凸模强度一般不作计算，但对于冲厚料和细长的凸模，为了防止凸模压碎或纵向失稳而折断，必须进行凸模承压能力和抗弯能力的校核。

① 承压能力校核

a）圆形凸模。冲裁时凸模承受的应力有平均应力 σ 和刃口的接触应力 σ_K 两种。凸模直径大于工件厚度时，接触应力 σ_K 大于平均应力 σ，因此强度核算的条件是接触应力 σ_K 小于或等于凸模材料的许用应力 σ_p，即

当 $d>t$ 时，凸模强度按下式核算

$$\sigma_K=\frac{2\tau}{1-0.5\frac{t}{d}}\leqslant\sigma_p$$

当 $d\leqslant t$ 时，凸模强度校下式核算

$$\sigma=4\left(\frac{t}{d}\right)\tau\leqslant\sigma_p$$

式中，t 为工件材料厚度，mm；d 为凸模直径，mm；τ 为工件材料抗剪强度，MPa；σ_K 为凸模刃口接触应力，MPa；σ 为凸模平均应力，MPa；σ_p 为凸模材料许用应力，对于常用合金模具，可取 1 800～2 200 MPa。

b）非圆形凸模。当凸模横截面宽度大于工件材料厚度 t 时（见图 2.3-53）可按下式核算刃口接触应力 σ_K，即

$$\sigma_K=\frac{Lt\tau}{A_K}\leqslant\sigma_p$$

式中，L 为工件轮廓长度，mm；t 为工件材料厚度，mm；τ 为工件材料抗剪强度，MPa；A_K 为接触面积，mm²，取接触宽度为 $t/2$；σ_K 为凸模刃口接触应力，MPa；σ_p 为凸模材料许用应力，MPa。

当凸模端面宽度 B 小于或等于工件材料厚度 t 时（见图 3.2-53b）按接触宽度 $t/2$ 作出的内界线互相交叉，接触面互相重叠，此时平均应力 σ 核算凸模强度：

$$\sigma=\frac{Lt\tau}{A}\leqslant\sigma_p$$

式中，A 为工件平面面积，mm²；σ 为凸模平均压应力，MPa。

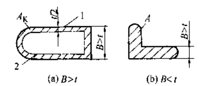


图 3.2-53 计算凸模强度时面积取法

1—工件轮廓线，即接触面的外界线；2—接触面的内界线

② 抗弯强度核算（见图 3.2-54）按凸模是否具有导向装置分别核算

a）无导向装置的凸模

对于圆形凸模

$$L_{max}\leqslant 90\frac{d^2}{\sqrt{F}}$$

对于非圆形凸模

$$L_{max}\leqslant 416\sqrt{\frac{J}{F}}$$

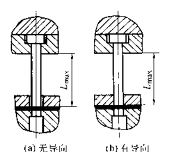


图 3.2-54 抗弯强度校核示意图

b）有导向装置的凸模

对于圆形凸模

$$L_{max}\leqslant 270\frac{d^2}{\sqrt{F}}$$

对于非圆形凸模

$$L_{max}\leqslant 1\,180\sqrt{\frac{J}{F}}$$

式中，L_{max} 为凸模许可的最大长度，mm；d 为凸模的最小直径，mm；F 为冲裁力，N；J 为凸模最小横截面的惯性矩，mm⁴。

以上关于凸模强度的校核，既适用于冲裁凸模，也适用于成形凸模。

8.2 凹模及其固定方法

（1）凹模结构形式

常见冲裁凹模刃口及孔壁结构形式列于表 3.2-30。

表 3.2-30 常见冲裁凹模刃口及孔壁结构形式

序号	简 图	特 点	适用范围
1	α	刃壁带有斜度，冲件或废料不易滞留在刃孔内，因而减轻对刃壁的磨损，一次刃磨量较少。刃口尺寸随刃磨变化 凹模工作部分强度好 α 一般取 5′～30′	适用于冲件为任何形状、各种板厚的冲裁模（但料太薄不宜采用）
2	α 1～2	同序号 1 但由于刃壁与漏料孔用台肩过渡，因此凹模工作部分强度较差	适用于形状简单、材料较薄的零件的冲裁模（一般 $\delta\leqslant$ 3 mm）
3	α	凹模厚度即有效刃壁高度。刃壁带有斜度，冲件或废料不易滞留在刃孔内，因而刃壁磨损小，一次刃磨量少 α 一般取 5′～15′	适用于凹模较薄的小型薄料冲裁模

续表 3.2-30

序号	简图	特点	适用范围
4		刃壁无斜度，刃磨后刃口尺寸不变。凹模工作部分强度较好	适用于精密冲裁模和把冲件或废料逆冲压方向推出的复合模
5	1~2	刃壁无斜度，刃磨后刃口尺寸不变。但由于刃壁后端扩大，因此凹模工作部分强度较差	适用于把冲件或废料逆冲压方向推出的形状简单、材料较薄的复合模。也适用于薄料冲裁模
6		凹模厚度即有效刃壁高度，刃壁无斜度，刃磨后刃口尺寸不变	适用于精冲模
7	30°~45° 2~5	凹模硬度较低，一般为40HRC左右 可借敲击调整模具间隙	适用于软而薄的金属冲裁模和非金属冲裁模

(2) 凹模固定方式

常见凹模固定方式列于表 3.2-31。

表 3.2-31 常见凹模固定方式

序号	简图	说明
1		最常见固定方式，螺钉紧固，销钉定位
2		圆凹模压入固定板后，用螺钉、销钉紧固

续表 3.2-31

序号	简图	说明
3	键	用内六角螺钉固定
4		可快速更换凹模

表 3.2-31 图 3 所示压入式圆凹模冲非圆形孔时，需采用平键、骑缝销等防转结构，如图 3.2-55 所示。

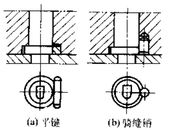


图 3.2-55 圆形凹模防转结构

(3) 凹模外形尺寸确定

凹模厚度和壁厚可用经验公式计算

凹模厚度 $H = KB$

凹模壁厚 $C = (1.5 \sim 2)\ H$

式中，B 为凹模孔的最大宽度，mm，但 B 不小于 15 mm；C 为凹模壁厚，mm，是指刃口至外形边缘的距离；K 为系数，见表 3.2-32。

表 3.2-32 系数 K 值

料厚 t/mm B/mm	0.5	1	2	3	>3
<50	0.30	0.35	0.42	0.50	0.60
50~100	0.20	0.22	0.28	0.35	0.42
100~200	0.15	0.18	0.20	0.24	0.30
>200	0.10	0.12	0.15	0.18	0.22

凹模厚度 H 和壁厚 C 也可从表 3.2-33 查得。

表 3.2-33 凹模厚度 H 和壁厚 C

mm

料厚 凹模外形尺寸 凹模孔的最大宽度 B	≤0.8		>0.8~1.5		>1.5~3		>3~5		>5~8		>8~12	
	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H
<50 50~75	26	20	30	22	34	25	40	28	47	30	55	35
75~100 100~150	32	22	36	25	40	28	46	32	55	35	65	40
150~175 175~200	38	25	42	28	46	32	52	36	60	40	75	45
>200	44	28	48	30	52	35	60	40	68	45	85	50

凹模的外形尺寸已标准化，用以上方法求得的外形尺寸应向接近的标准尺寸靠拢。

用上述方法确定的凹模尺寸，强度和刚度足够，一般不再进行强度和刚度的核算。

复合模用的凸凹模最小壁厚 a 的数值，列于表 3.2-34。

表 3.2-34　凸凹模最小壁厚 a 的数值

mm

料厚	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.75
最小壁厚 a	1.4	1.6	1.8	2.0	2.3	2.5	2.7	3.2	3.8	4.0
最小直径 D	15					18			21	
料厚	2.0	2.1	2.5	2.75	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
最小壁厚 a	4.9	5.0	5.8	6.3	6.7	7.8	8.5	9.3	10.0	12.0
最小直径 D	21	25		28		32		35	40	45

(4) 镶拼结构

凹模和凸模镶拼结构主要适用于尺寸较大或形状复杂的零件，以及便于更换容易磨损部位的模具。凹模和凸模镶拼结构有以下三种形式。

1) 拼接式。如图 3.2-56、图 3.2-57 所示，每个镶块分别由螺钉和销钉紧固在固定板上。适用于凹模和凸模采用整体结构时制造困难的情况。

图 3.2-56　大型拼接结构落料凹模

图 3.2-57　大型拼接结构冲孔凹模

2) 嵌入式。如图 3.2-58a 和 b 所示，前者适用于局部磨损较快，后者适用于悬臂较长容易折断的情况。这类模具最初制造时也可做成整体式结构，在使用过程中，薄弱的部分出现损坏时，可按预先设定的镶块形状和尺寸将该局部切掉，然后再将新制的镶块嵌入。此项工作可以用高精度数控线切割加工中心来完成。

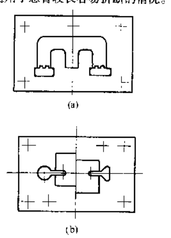


图 3.2-58　嵌入式镶拼结构凹模

3) 压入式。如图 3.2-59 和图 3.2-60 所示，将各镶块压入矩形或圆形的容框内，构成所需的凹模型腔。

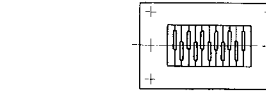
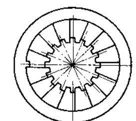


图 3.2-59　矩形压入式镶拼结构凹模



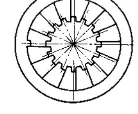


图 3.2-60　圆形压入式镶拼结构凹模

设计镶拼结构凹模和凸模的原则：

① 选择镶拼结构的形式必须根据工件形状、材料厚度和镶拼结构能承受的胀力大小来确定。

② 镶块的选择应有利于锻造、热处理和机械加工。

③ 镶块之间应防止在冲压过程中产生相对的位移。

④ 沿对称线分割形状，以利于加工。见图 3.2-61。

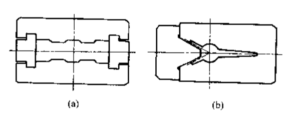


图 3.2-61　对称形状凹模镶块结构

⑤ 易损坏的部分应单独做成一块，以利于更换。见图 3.2-58a 和 b。

⑥ 圆弧应单独做成一块，拼接线应在直线部分，一般离圆弧 4～7 mm，见图 3.2-62。

⑦ 拼接面不宜过长，尽可能和刃口垂直，见图 3.2-62。

⑧ 凹模镶块接缝处应和凸模镶块接缝处错开，以避免在工件上产生毛刺，如图 3.2-63 所示。

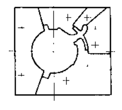


图 3.2-62　复杂形状凹模镶块结构

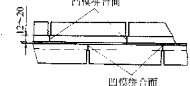


图 3.2-63　凹模、凸模镶块拼合面接缝错开结构

8.3　模具定位零件及选用

定位零件的设计原则：

1) 定位至少应有一个支承点，两个导向点，一个定程点。各点之间应有足够的距离，保证板坯定位稳定。

2) 定位的方向和位置必须和人们的习惯相适应，如右手操作比左手操作可靠。

3) 多工位连续模应设有料端初始定位和料末最终定位，以保证始端和末端进距正确，防止产生废品，节约原材料。

4) 用多套模具完成的工件，应尽可能采用相同的定位基准，以提高冲件的精度。

定位零件的基本形式：

用于冲模的定位零件有挡料销、定位板（钉）、导向销、定距侧刃和侧压装置五类。

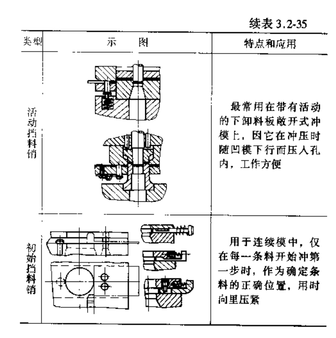
(1) 挡料销

挡料销的功能是保证条料有准确的送料距离，其类型列于表 3.2-35。

表 3.2-35　挡料销类型

类型	示　　图	特点和应用
圆柱头式挡料销		一般固定在凹模上，由于固定部分和工作部分的直径差别，不至于削弱凹模强度，并且制造简单、操作方便 用于带固定卸料板和弹性卸料板的冲模
钩形挡料销		其位置可离凹模刃口更远一些，但由于形状不对称，需要钻孔并另加防转装置，适用于冲制较大较厚的工件
回伸挡料销		装在卸料板上，当被加工条料向前推进时，就对其斜面施加压力，而将挡料销抬高并将弹簧抬起，不必将带料在挡料销上套进套出，但定位时需将条料前后移动，因此生产率低 适用冲裁窄形工件(6～20) mm 和厚度大于 0.8 mm 材料的定位

续表 3.2-35



类型	示　　图	特点和应用
活动挡料销		最常用在带有活动的下卸料板敞开式冲模上，因它在冲压时随凹模下行而压入孔内，工作方便
初始挡料销		用于连续模中，仅在每一条料开始冲第一步时，作为确定条料的正确位置，用时向里压紧

(2) 定位板（钉）

定位板用于冲裁、修边和成形，见表 3.2-36。

表 3.2-36　定位板（钉）类型

类型	示　　图	特点和应用
定位销	60°, D_1, D, δ, 2, h, d, H-1.5δ δ/mm: <1, 1～2, 2～3, >3～5 h/mm: δ+2, δ+1, δ+1, δ D_1-D/mm: 0.1, 0.15, 0.2, 0.25	小型孔用定位钉，适用于孔径在 15 mm 以下的圆孔定位
定位销	D_1, D, 45°, δ, 2, h, d, H-1.5δ δ/mm: <1, 1～2, 2～3, >3～5 h/mm: δ+2, δ+1, δ+1, δ (D_1-D)/mm: 0.1, 0.15, 0.2, 0.25	中型孔用定位钉，适用于孔径在 D = 15～30 mm 的孔定位
定位板		大型圆孔用削边定位板，适用于孔径 D > 30 mm 的孔定位
定位板		用于大型冲压件或毛坯外轮廓的定位

续表 3.2-36

类型	示 图	特点和应用
定位销		用于大型冲压件或毛坯外轮廓的定位
孔定位板		系大型非圆孔用定位板

(3) 导正销

用于连续模以保证工件内孔和外形的位置精度的导正销见表 3.2-37 中序号 1～6。表中序号 7～9 所示结构用于连续模以控制送料步距的精度。

导正销的直径 D_1 和高度 h 的确定

$$D_1 = d - 2a$$

式中，d 为冲孔凸模直径；$2a$ 为导正销与孔径两边的间隙，其值见表 3.2-38。

表 3.2-37 导正销类型

序号	示 图	应 用
1		用于直径在 6 mm 以下的孔
2		用于直径在 10 mm 以下的孔
3		用于直径在 3～10 mm 的孔

续表 3.2-37

类型	示 图	特点和应用
4		用于直径在 10～30 mm 的孔
5		用于板厚为 20～50 mm 的孔
6		用于小的导正销，更换方便
7		用于薄料，导正销装在上模固定板中。一般在条料两侧空孔处设工艺孔时采用
8		活动式导正销，可避免送料错位而引起导正销损坏
9		快换导正销

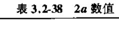
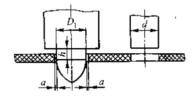


表 3.2-38 2a 数值 mm



续表 3.2-28

条料厚度 δ	冲孔凸模直径 d						
	1.5~6	>6~10	>10~16	>16~24	>24~32	>32~42	>42~60
<1.5	0.04	0.06	0.06	0.08	0.09	0.10	0.12
>1.5~3	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16
>3~5	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	0.18	0.20

导正销的高度 h 值见表 3.2-39。图参阅表 3.2-38 插图。

表 3.2-39　导正销高度 h　mm

条料厚度 t	冲件尺寸		
	1.5~10	>10~25	>25~50
<1.5	1	1.2	1.5
>1.5~3	$0.6t$	$0.8t$	t
>3~5	$0.5t$	$0.6t$	$0.8t$

(4) 定距侧刃

侧刃用于连续模以控制条料的步进距离，其定位准确、效率高，但材料消耗增加，多用于不适合采用上述挡料结构时，例如冲裁窄长的工件，步距小不能安装和使用固定挡料销；材料太薄（$t<0.5$ mm）采用导正销有可能压弯孔边而达不到定位目的，或者由于工件侧边需冲出一定形状而正好可由侧刃完成时。

1）侧刃的类型。侧刃的类型列于表 3.2-40。

表 3.2-40　定距侧刃类型

类型	示图	特点和应用
长方形侧刃		制造简单，使用方便，但因角部易磨损变钝而产生毛刺，影响条料准确定位和送进，常用于精度不高、料厚 $\delta<1.5$ mm 的连续模中
特殊形侧刃		当需要冲切条料一侧或两侧的成形边缘时，需要设计出相应的特殊形侧刃
成形侧刃		用成形侧刃切出条料的横肩定位时，是靠直线部分与侧刃挡板接触，条料横肩角部毛刺位于侧边凹进处，不影响定位，因此定位精度高，但形状复杂，制造困难并增加了废料。用于精度较高、料厚 $\delta<3$ mm 的连续模中
尖角侧刃		在条料的边缘上冲裁一个切口，在下一步时，挡销即伸入这个缺口定位，耗料少，但操作不便（需要将条料前后移动），生产率低，用在料厚 1~2 mm 的条料定距，一般比较少用

侧刃断面长度

$$L=S+(0.05\sim0.10)\ \text{mm}$$

式中，S 为送料步距的公称尺寸，mm；系数 0.05~0.10 的选取：工步数值大的取大值，冲薄料取小值。

侧刃断面的宽度

$$B=6\sim10\ \text{mm}$$

侧刃孔按侧刃配作留单边间隙。

侧刃制造公差取步距公差的 1/4。

侧刃切下料边宽度近似等于材料厚度。

2）侧刃的固定。侧刃一般用以下几种方法固定，如图 3.2-64 所示。

侧刃端部的凸起部分，冲裁时先于侧刃进入凹模，平衡侧刃单边冲裁时产生的侧向力，防止侧刃折断。

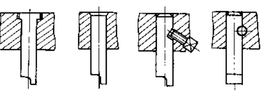


图 3.2-64　侧刃固定方法

3）侧刃的数量。侧刃的数量可以是一个，也可以是两个。两个侧刃可以是并列布置，也可按对角布置。对角布置可保证料尾的充分利用。

单侧刃用于工步数少的连续模，工步数较多的连续模宜采用两个对角布置的侧刃，如图 3.2-65 所示。

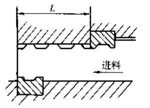


图 3.2-65　双成形侧刃定距

(5) 导尺和侧压

1）导尺或导料销。使用条料或卷料冲裁时，一般用导尺或导料销来导正材料的送进方向。

导尺用于刚性卸料，如图 3.2-66a、图 3.2-66b 所示。导料销用于弹性卸料，如图 3.2-66c 所示。

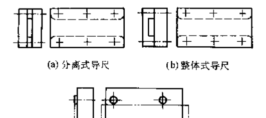


图 3.2-66　导料装置

2）侧压装置。在连续模中，为了节约材料，减少条料宽度，常采用侧压装置，如表 3.2-41 所示。

采用侧压装置时应注意：

① 在条料厚度小于 0.3 mm 时，不能采用侧压装置。

② 采用辊式自动送料时，不宜采用侧压装置，因侧壁的摩擦力会影响送料精度。

表 3.2-41 侧压装置类型

类型	示图	特点及应用
簧片	送料方向←	结构简单，但侧压力较小，适用于冲裁工件尺寸小、材料厚度为 1 mm 以下的薄料。侧压块厚度一般为侧向导尺厚度的 1/3～2/3，压块数量视具体情况而定
簧片压块式		
弹簧压块式	H；$H_1(\frac{H8}{f9})$；4～5；$B(\frac{H8}{f9})$；1～3；L	由于利用弹簧，所以侧压力较大，适用于冲裁厚料，一般设置 2～3 个
压板式	送料方向←；1—侧刃挡板；2—侧刃；3—侧压板；4—侧面导尺	侧压力大而均匀，使用可靠，一般装在送料端，在单侧刃的连续模中使用

8.4 卸料及出件装置

（1）卸料装置

卸料装置分为固定卸料和弹性卸料两种结构。

1）固定卸料板结构。固定卸料板用于工件料厚大于 0.8 mm、平面度要求不高、卸料力较大的情况。

固定卸料板的各种结构形式示于图 3.2-67，图 3.2-67a 是最常用的结构；图 3.2-67b 为整体式，即卸料板和导板做成一体，适于条料宽度比较窄的情况。图 3.2-67c 为悬臂卸料板，主要适用于料厚 $t \geqslant 2$ mm 的大型零件边缘处的冲裁及在弯曲件冲孔。图 3.2-67d 为拱形卸料板，用于空心件及弯曲件底部冲孔时卸料。图 3.2-67e 为半固定式卸料板，此结构可减少凸模的高度。

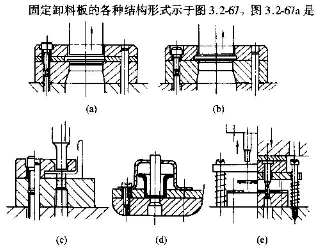


图 3.2-67 固定卸料板形式

2）弹性卸料板结构。弹性卸料板的结构形式示于图 3.2-68。图 3.2-68a 为常用的结构；图 3.2-68b 为带小导柱的弹性卸料板，这种卸料板兼作凸模导向；图 3.2-68c 用橡皮直接卸料，用于小批量生产薄料冲裁卸料。

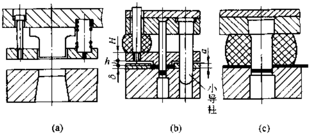


图 3.2-68 弹性卸料板结构

3）卸料板尺寸

① 固定卸料板。固定卸料板开孔结构示于图 3.2-69a 和凸模的单边间隙 $c =（0.1 \sim 0.5）t$，t 为材料厚度，硬材料

单边间隙取大值，软材料取小值。

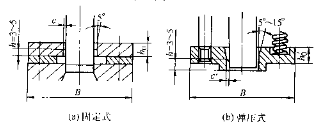


图 3.2-69 卸料板尺寸

固定卸料板厚度 h_0 从表 3.2-42 中选取。

② 弹性卸料板。弹性卸料板开孔结构示于图 3.2-69b，和凸模的单边间隙 $c'=(0.1\sim0.2)\ t$，t 为材料厚度。

弹性卸料板的厚度 h'_0 从表 3.2-42 中选取。

表 3.2-42 卸料板厚度 mm

冲件料厚 δ	卸料板宽度 B									
	≤50		>50~80		>80~125		>125~200		>200	
	h_0	h'_0	h_0	h'_0	h_0	h'_0	h_0	h'_0	h_0	h'_0
~0.8	6	8	6	10	8	12	10	14	12	16
>0.8~1.5	6	10	8	12	10	14	12	16	14	18
>1.5~3	8	—	10	—	12	—	14	—	16	—
>3~4.5	10	—	12	—	14	—	16	—	18	—
>4.5	12	—	14	—	16	—	18	—	20	—

注：h_0 为固定卸料板厚度，mm；h'_0 为弹压卸料板厚度，mm。

4）卸料板弹簧安装及螺钉结构。卸料板弹簧安装结构见表 3.2-43。

表 3.2-43 卸料板弹簧安装结构

序号	简图	说明
1		单面弹簧座孔，用于弹簧外露高度 h 小于外径 D 的情况
2		弹簧心杆用于板薄不宜开弹簧座孔的情况 心柱外径 $B=D_1-(1\sim2)$ mm，其中 D_1 为弹簧内径
3		双面加工弹簧座孔，适用于 $h>D$ 的情况
4		套在卸料螺钉外面的弹簧 $B=D_1-(2\sim3)$ mm

卸料螺钉结构示于表 3.2-44。

表 3.2-44 常用卸料螺钉结构

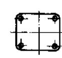
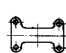
序号	简图	说明
1		标准卸料螺钉结构。凸模刃磨后需在卸料螺钉头下加垫圈调节
2		卸料螺钉圆柱部分进入卸料板 $f=3\sim5$ mm，以防止螺纹根部受侧压力 凸模刃磨后也需在卸料螺钉头下加垫圈调节
3	黄铜销 螺钉	距离 L 可调节。为防止螺纹松动，用螺钉支紧从而承受较大的侧压力
4		同序号 3，以螺母防止螺纹松动，结构简便，但占据较多空间
5	螺钉 钢管	以钢管代替标准卸料螺钉的台肩，容易保持卸料板的平行度。螺钉头部直径放大
6	内六角螺钉 垫圈 钢管	同序号 5。增加垫圈后螺钉头部不必放大，可仍用通用标准。垫圈宜淬硬

（2）出件装置

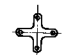
1）上模出件装置。表 3.2-45 给出了几种典型的上出件结构，它是通过冲床滑块内的打料机构完成推件工作。表中推板的结构按零件的形状设计，应考虑推力均衡分布并尽可能减少对模柄和模座强度的削弱。常用推板结构形式示于图 3.2-70。

表 3.2-45 上模推件装置结构

序号	示 图	说 明
1		1)推杆1通过推板2、推销3、推块4推下工件 2)推板设置在上模座的凹槽内，结构紧凑，但易削弱上模座的强度 3)适用于推杆投影范围内有凸模，模具闭合高度受到限制的场合
2		1)推杆直接推动推块，将工件推下 2)适用于推杆投影范围内无凸模的场合
3		推板设置在厚垫板内，可以不削弱上模座的强度
4		1)顶出器上附设弹顶器 2)可避免薄料或涂油冲裁件粘附在顶出器上

(a) 用于矩形工件的推板

(b) 用于正方形工件的推板

(c) 用于圆形工件的推板

图 3.2-70 推板结构形式

2) 下模出件装置。凹模装在下模座上时，如果工件不能通过模具的底部漏出，则需要通过冲床工作下的弹性垫驱动推板，顶出工件。

图 3.2-71 所示为凹模装在下模座上，利用工作台下的弹性垫，通过一组顶杆驱动推板，从凹模中顶出工件的结构。

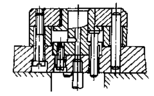


图 3.2-71 下模顶件结构

8.5 安装、夹持零件及标准模架的选择

(1) 模柄

模柄的结构类型和应用列于表 3.2-46。

表 3.2-46 模柄类型及应用

类型	示 图	特点及应用
整体式		
压入式		应用较广泛，主要用于上模板较厚时
旋入式		用于中、小型模具
螺钉固定凸缘式		用于大型模具
浮动式		可消除压力机导向误差对模具的影响，用于精密导柱模

(2) 垫板和凸、凹模固定板

垫板的作用是将凸模承受的压力均布到模座上，避免凸模直接和模座接触，导致压强过高而压塌模座面。一般铸铁模座面的比压超过 100 MPa，钢板模座面的比压超过 200 MPa 时就需要采用垫板。

垫板淬硬磨平，外形尺寸和凸模固定板一致，其厚度与外形尺寸的关系列于表 3.2-47。

表 3.2-47 垫板尺寸 mm

垫板厚度	最大外形尺寸		最小外形尺寸	
	矩形 $a\times b$	圆形 d	矩形 $a\times b$	圆形 d
4	100×100	100	—	—
6	160×140	140	63×50	63
8	250×200	200	125×100	125
10	315×315	315	160×160	160
12	—	—	250×250	250

凸、凹模固定板的作用是固定凸模、凸凹模等工作零件。其形状有矩形和圆形，平面形状除保证固定工作零件外，还应该考虑紧固螺钉和定位销的位置，厚度一般为凹模厚度的50%～80%。

(3) 模架

模架包括上模座、下模座、导柱和导套。根据模架导向用的导柱和导套间的配合性质分为滑动导向模架和滚动导向模架两大类。每类模架中，由于导柱安装位置和数量不同，又各具有多种模架形式。

以下各表列出了各种类型标准模架的结构、功能、用途和精度等级，供选用。

表3.2-48给出了滑动导向和滚动导向模架标准结构形式的功能和用途。

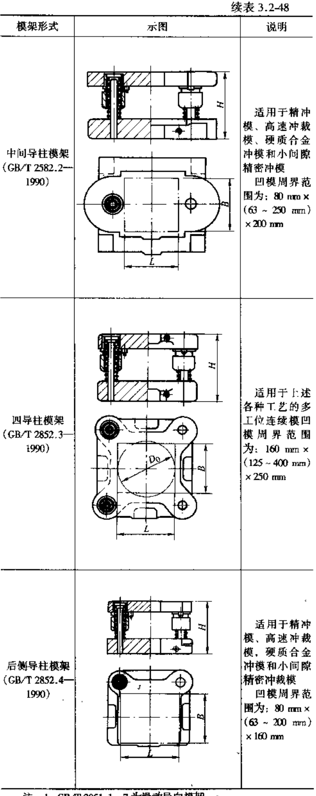
表3.2-48 标准模架形式的功能和用途

模架形式	示图	说明
对角导柱模架(GB/T 2851.1—1990)		在凹模面积的对角中心线上，装有前、后导柱，其有效区在毛坯进给方向的导套间。受力平衡，上模座在导柱上运动平稳。适用于纵向或横向送料，使用面宽，常用于级进模或复合模。其凹模周界范围为：63 mm×(50～500 mm)×500 mm
后侧导柱模架(GB/T 2851.3—1990)		两导柱、导套分别装在上、下模座后侧，凹模面积是导套前的有效区域。可用于冲压较宽条料，且可用边角料。送料及操作方便，可纵向、横向送料。主要适用于一般精度要求的冲模，不宜用于大型模具，因有弯曲力矩，上模座在导柱上运动不平稳。其凹模周界范围为：63 mm×(50～400 mm)×250 mm
后侧导柱窄形模架(GB/T 2851.4—1990)		主要用于窄长零件和特殊冲压工艺的冲模。其凹模周界范围为：250 mm×(80～800 mm)×200 mm

续表3.2-48

模架形式	示图	说明
中间导柱模架(GB/T 2851.5—1990)		其凹模面积是导套间的有效区域，仅适用于横向送料，常用于弯曲模或复合模。具有导向精度高、上模座在导柱上，运动平稳的特点。其凹模周界范围为：63 mm×(50～500 mm)×500 mm
中间导柱圆形模架(GB/T 2851.6—1990)		常用于电机行业冲模，或用于冲压圆形制件的冲模。其凹模周界范围为：63 mm×(100～630 mm)×380 mm
四导柱模架(GB/T 2851.7—1990)		模架受力平衡，导向精度高。适用于大型制件、精度很高的冲模，以及大批量生产的自动冲压生产线上的冲模。其凹模周界范围为：160 mm×(250～630 mm)×400 mm
对角导柱模架(GB/T 2582.1—1990)		适用于精冲模、高速冲裁模、硬质合金冲模和小间隙精密冲模。凹模周界范围为：80 mm×(63～250 mm)×200 mm

续表 3.2-48

模架形式	示图	说明
中间导柱模架（GB/T 2582.2—1990）		适用于精冲模、高速冲裁模、硬质合金冲模和小间隙精密冲模 凹模周界范围为：80 mm×(63～250 mm)×200 mm
四导柱模架（GB/T 2852.3—1990）		适用于上述各种工艺的多工位连续模凹模周界范围为：160 mm×(125～400 mm)×250 mm
后侧导柱模架（GB/T 2852.4—1990）		适用于精冲模、高速冲裁模，硬质合金冲模和小间隙精密冲裁模 凹模周界范围为：80 mm×(63～200 mm)×160 mm

注：1. GB/T 2851.1～7 为滑动导向模架。
2. GB/T 2852.1～4 为滚动导向模架。

滚动导向模架中，钢球的直径比导柱和导套间的间隙大 0.01～0.02 mm，属于过盈滚动导向，即要求钢球和导柱、导套之间保持纯滚，它们之间不得有相对滑动，否则会产生擦伤，这是必须避免的。

保证钢球和导柱、导套之间保持纯滚的条件是：当上、下模座相对运动时，在导柱、导套间的钢球保持圈必须处于浮动状态，模座带着钢球保持圈同方向运动，若模座运动距离为 S，则钢球保持圈必须同方向运动 $1/2S$，否则就会出现以上所述的擦伤，因此使用滚动导向的模架时，应该保证模座上下运动时，钢球保持圈有足够的运动空间。

过盈滚动导向的优点是导向精度高，可保证上下模严格对中，间隙均匀；滚动过程磨损极小，寿命长。因此滚动导向的模架广泛用于精冲模，小间隙精密冲模、硬质合金模和高速冲裁模等要求导向精度较高的模具。

滚动导向的缺点是运动时抗偏载的能力差，钢球和导柱导套之间是点接触，受侧向力时很容易产生弹性变形而偏移，导向刚性差。

单工位冲模压力中心和几何中心重合或接近，不会产生偏载和出现上述情况；多工位连续模产生偏载是不可避免的，此时在模具结构上需采取措施。防止滚动导向产生偏移导致凸、凹模受损。

根据 GB/T 2854—1990。滑动导向模架精度分为Ⅰ级和Ⅱ级，滚动导向模架精度分为 0Ⅰ级和 0Ⅱ级。各级精度模架的技术指标列于表 3.2-49。导柱导套间的间隙或过盈量列于表 3.2-50。

表 3.2-49 各级精度模架的技术指标

项	检查项目	被测尺寸/mm	模架精度等级 0Ⅰ、Ⅰ级	模架精度等级 0Ⅱ、Ⅱ级
			公差等级	
A	上模座上平面对下模座下平面的平行度	<400	5	6
		>400	6	7
B	导柱轴心线对下模座下平面的垂直度	≤160	4	5
		>160	5	6

注：公差等级按 GB/T 1184—1996。

表 3.2-50 导柱、导套配合间隙（或过盈量） mm

配合形式	导柱直径	模架精度等级 Ⅰ级	模架精度等级 Ⅱ级	配合后的过盈量
		配合后的间隙值		
滑动配合	<18	≤0.010	≤0.015	—
	>18～30	≤0.011	≤0.017	
	>30～50	≤0.014	≤0.021	
	>50～80	≤0.016	≤0.025	
滚动配合	>18～35	—	—	0.01～0.02

9 提高冲裁件质量和精度的方法

用普通冲裁所得到的工件，剪切面上有塌角、断裂带和毛刺，还带有明显的锥度，表面粗糙度仅为 $R_a6.3$～$12.5\ \mu m$，同时，制件尺寸精度很低，一般为 IT10～11。但当要求冲裁面的剪切面作为基准面或配合面时，采用一般的冲裁工艺已不能满足零件的技术要求，这时必须采用提高冲裁件质量和精度的工艺方法，如表 3.2-51 所示。

表 3.2-51　提高冲裁件质量和精度的几种工艺方法

工艺名称	简　图	方法要点	主要优缺点
整修		切除不光洁表面，单边间隙 0.006～0.01 mm 或负间隙，按材料厚度和形状决定整修余量和次数	精度高，表面粗糙度小，塌角和毛刺小。定位要求高，不易除屑。效率低于精冲
挤光		锥形凹模挤光余量单边小于 0.04～0.06 mm。凸、凹模的间隙一般取（0.1～0.2）t （t—材料厚度）	质量低于整修和精冲，只适用于软材料，效率低于精冲
负间隙冲裁	c　d　D	凸模尺寸大于凹模尺寸（0.05～0.3）t，凹模圆角（0.05～0.1）t	表面粗糙度较小，适用于软的有色金属及合金，软钢等
小间隙圆角刃口冲裁		间隙小于 0.02 mm 落料：凹模刃口圆角半径为 0.1t 冲孔：凸模刃口圆角半径为 0.1t	表面粗糙度较小，塌角和毛刺较大
平面压边精冲	压边圈	压边圈上设有 V 形齿，为平面形状。间隙大约为齿圈压板精冲的一半，间隙与料厚无关	压边圈不需加工齿形，制造容易。冲 6～8 mm 厚的理想精冲料，零件剪切面质量与一般精冲无明显的差别
同步剪挤式冲裁		凸模切入板料（0.15～0.35）t，凸模 ab 面随即挤压板料 凸、凹模单边间隙 0.01～0.05 mm，刃口圆角半径为 0.05～0.2 mm	剪切面平滑，表面粗糙度小。对材料的性能和厚度有较大的适应性，无需专用精冲设备。但对异形零件模具制造和维修困难
对向凹模冲裁	凸模 凸起凹模 凹模 顶杆	凸凹模： 凸起高度（1～1.2）t 凸起平顶宽度（0.3～0.4）t 凸起倾角 25°～30° 凸起压入深度 70～80%t 冲裁凸模与凸凹模之间间隙：（0.01～0.03）mm 凸模与平凹模之间间隙：（0.01～0.05）mm	能得到无毛刺、光洁断面，对材料的适应性强

续表 3.2-51

工艺名称	简　图	方法要点	主要优缺点
齿圈压板精冲		见本章第 10 节	

10　精密冲裁

精密冲裁简称精冲，是一种先进制造技术，一次冲压就能获得尺寸公差 IT7～IT8 级、剪切面粗糙度 R_a2.5～0.63 μm 的工件，可以取代扁平类零件的切削加工，具有优质、高效、低耗和面广的特点，技术经济效果十分显著，深受制造行业的重视。

10.1　精冲机理

（1）精冲工艺过程特征

精冲过程如图 3.2-72 所示，是在冲裁力 F_1、压边力 F_2 和反压力 F_3 同时作用下进行的。

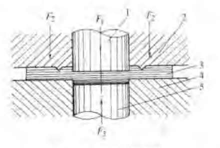


图 3.2-72　精冲过程示意图

1—凸模；2—压边圈；3—坯料；4—凹模；5—反压板

精冲从形式上看是分离工序，但实际上工件和条料在最后分离前始终保持为一个整体，即精冲过程中材料自始至终是塑性变形的过程。这一点可以从图 3.2-73 所示的精冲变形剖面宏观照片和图 3.2-74 所示的精冲工艺力能－行程图中看出。



图 3.2-73　精冲变形区剖面宏观照片

照片表明：精冲变形区材料纤维沿厚度方向有很大的伸长，沿径向材料纤维密集有压缩，即使精冲接近完成工件和条料仍为一个整体；图 3.2-74 中的曲线 1 为精冲力曲线，可以看出：即使在接近精冲终了时，工件和条料之间仍然保持一定的强度，继续冲裁时凸模还需给出足够的冲裁力，直到精冲过程结束时为止。这和普通冲裁形成鲜明的对照，如图



3.2-74中的虚线所示。普通冲裁当凸模进入材料1/3左右料厚时，工件就已经和材料分离，凸模继续下行不再需要克服变形抗力。

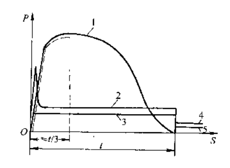


图3.2-74 精冲工艺力-行程图

1—冲裁力；2—压边力；3—反压力；4—卸料力；5—顶件力

由于精冲过程中塑性变形所引起的剪切面表层的加工硬化曲线示于图3.2-75。从图中可以看出，硬化曲线呈半梨形。凹模侧最低，沿厚度方向逐渐增加，靠近凸模侧硬度最高，超过芯部原始硬度一倍多。需要时，选用合适的材料，利用精冲时剪切面表层的硬化，可取消后续的热处理工序。

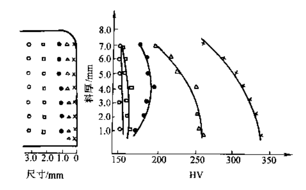


图3.2-75 精冲件剪切面及内层的硬化曲线

材料：Q345 料厚：8 mm 原始硬度160HV

×—剪切表面；△—距表面0.5 mm；●—距表面1 mm

□—距表面2 mm；○—距表面3 mm

(2) 精冲变形模式

根据对精冲塑性变形过程的测试，观察和分析提出了精冲变形模式如图3.2-76所示。

图3.2-76a表示精冲开始时的情况，图3.2-76b表示冲裁凸模进入材料一定深度 x 时的情况。A、B 两点分别表示凸模和凹模的刃口，AB 联线将间隙区分为Ⅰ、Ⅱ两个部分，塑性变形主要集中在间隙区，即Ⅰ、Ⅱ为塑性变形区。间隙两侧为刚性平移的传力区，它也分为两部分，即靠近Ⅰ，Ⅱ区的塑性变形影响区Ⅲ和弹性变形区Ⅳ。精冲的塑性变形始终在以 AB 为对角线的矩形中进行，例如当凸模进入材料一定深度 x 时，A 点以上的部分和 B 点以下的部分均已完成变形。精冲继续进行时，塑性变形在缩短了的 AB 为对角线的矩形中进行。精冲过程中Ⅰ区材料被凸模逐渐挤压到条料上，Ⅱ区材料被凹模挤压到工件上，当 AB 距离达最小值时，材料全部转移，精冲过程结束。

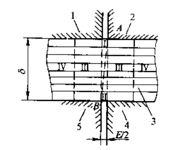
精冲件出现的倒锥现象，即凸模侧大，凹模侧小，就是上述材料转移的结果。

图3.2-76还给出了精冲塑性变形区的变形力示简图，其中主应力简图为三向压应力状态，主应变简图为平面应变状态，即 $\epsilon_1 = -\epsilon_2$，$\epsilon_3 = 0$。视精冲过程为纯剪切的变形过程。

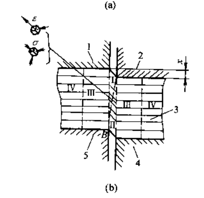
(3) 精冲变形区的应力分析

精冲时作用于材料的外力和变形区的应力如图3.2-77所示。

图中，P_y 为凸模作用于材料的冲压力，$P_y = P'_y + P''_y$；P'_y 为冲裁力；P''_y 为反压力；P_e 为压边圈V形环内边作用于材料的力；N 为作用于材料的侧向力；F_x，F_y 为模具表面作用于材料的摩擦力。



(a)



(b)

图3.2-76 精冲变形区域及变形过程

1—压边圈；2—凸模；3—工件；4—反压板；5—凹模

Ⅰ、Ⅱ—塑性变形区；Ⅲ—塑性变形影响区；Ⅳ—弹性变形区

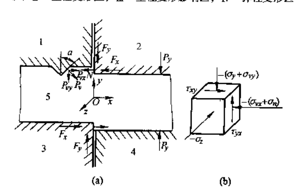


图3.2-77 精冲时作用于材料的外力及变形区承受的应力

1—压边圈；2—凸模；3—凹模；4—反压板；5—条料

1) 变形区内任一点的应力张量。在变形区内任一点 O 取坐标系 xyz，在该处取一基元六面体，其上作用的应力示于图3.2-77b。σ_y 系由 P_y 引起的正应力，σ_{vx}、σ_{vy} 分别由 P_v 在 x 方向的分量 P_{vx} 和 y 方向的分量 P_{vy} 引起的正应力，σ_n 为侧向力 N 引起的正应力，σ_z 为模具对材料约束作用而引起的正应力，切应力由外摩擦力而引起。

O 点的应力张量以 T_σ 表示

$$T_\sigma = T'_\sigma + T''_\sigma$$

式中，T'_σ 为球形应力张量；T''_σ 为应力偏量。

$$T_\sigma=\begin{Bmatrix} -\sigma_{wx}+\sigma_n & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & -(\sigma_y+\sigma_{vy}) & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_z \end{Bmatrix}$$

$$=\begin{Bmatrix} -\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_m \end{Bmatrix}+$$

$$\begin{Bmatrix} -\frac{2}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n)+\frac{1}{3}(\sigma_y+\sigma_{vy}+\sigma_z) & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \frac{1}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n+\sigma_z)-\frac{2}{3}(\sigma_y+\sigma_{vy}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{3}\sigma_z+\frac{1}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n+\sigma_y+\sigma_{vy}) \end{Bmatrix}$$

$$T'_\sigma=\begin{Bmatrix} -\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_m \end{Bmatrix}$$

$$-\sigma_m=-\frac{1}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n+\sigma_y+\sigma_{vy}+\sigma_z)$$

球形应力张量系 O 点所受的静水压，它影响该点材料的塑性。

$$T''_\sigma=\begin{Bmatrix} -\frac{2}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n)+\frac{1}{3}(\sigma_y+\sigma_{vy}+\sigma_z) & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \frac{1}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n+\sigma_z)-\frac{2}{3}(\sigma_y+\sigma_{vy}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{3}\sigma_z+\frac{1}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n+\sigma_y+\sigma_{vy}) \end{Bmatrix}$$

应力偏量 T''_σ 包括一对切应力 τ_{xy}，τ_{yx}和由

$$\pm\frac{2}{3}\left[(\sigma_{vx}+\sigma_n)-\frac{1}{3}(\sigma_y+\sigma_{vy}+\sigma_z)\right],$$

$$\pm\left[\frac{2}{3}(\sigma_y+\sigma_{vy})-\frac{1}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n+\sigma_z)\right]$$

构成的二对切应力，应力偏量使材料在精冲过程中产生塑性变形。

2）关于提高变形区静水压力的分析。精冲时变形区的球形应力张量为

$$T_\sigma'=\begin{Bmatrix} -\sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_m \end{Bmatrix}$$

是该区所受的静水压力。而

$$-\sigma_m=-\frac{1}{3}(\sigma_{vx}+\sigma_n+\sigma_y+\sigma_{vy}+\sigma_z)$$

因此从上式可以知道影响变形区静水压力的因素，从而找到提高静水压的途径：

① 增大 σ_y。$\sigma_y=\sigma'_y+\sigma''_y$，$\sigma'_y$ 系冲裁力所引起的正应力，σ'_y 在材料一定时为一定值，σ''_y 系顶件反力 P''_y 所引起的正应力，因此增加 σ_y 只能通过增加σ''_y 来实现，就是说增大顶件反力是提高精冲变形区静水压的途径之一。

② 增大 σ_n。σ_n 为侧向力引起的正应力，它与凸、凹模之间的间隙及刃口的圆角密切相关，间隙偏大 σ_n 将降低，因此小间隙是实现精冲的关键因素。当然采用小间隙的目的不仅是为了提高 σ_n。在生产当中或在精冲试模时，如果发现工件某局部出现撕裂采取措施仍不能克服时，可将相应部位的刃口倒圆（外形倒凹模刃口、内形倒凸模刃口），借增加 σ_n 来提高静水压，作为抑制局部撕裂的一种办法。

③ 增大（$\sigma_{vx}+\sigma_{vy}$）。因为 $\sigma_v=\sqrt{\sigma_{vx}^2+\sigma_{vy}^2}$，显然增大（$\sigma_{vx}+\sigma_{vy}$）可通过增大 P_v 来实现，就是说增大压边力是提高精冲变形区静水压的途径之一。

④ 采用最佳压边圈齿形内角 α。当压边力一定时，还存在着压边圈齿形内角 α 取何值时（$\sigma_{vx}+\sigma_{vy}$）有最大值的问题。

由于 σ_{vx} 为 P_{vx} 引起的应力，σ_{vy} 为 P_{vy} 引起的应力，所以（$\sigma_{vx}+\sigma_{vy}$）的极值问题，可以归结为求（$P_{vx}+P_{vy}$）的极值问题。

由图 3.2-77 知：

$$P_{vx}=P_v\cos\alpha$$

$$P_{vy}=P_v\sin\alpha$$

$$P_{vx}+P_{vy}=P_v(\cos\alpha+\sin\alpha)$$

取极值：

$$\frac{d(P_{vx}+P_{vy})}{d\alpha}=0$$

得 $P_v(\cos\alpha-\sin\alpha)+dP_v(\cos\alpha+\sin\alpha)=0$

因压边力为一定，P_v 为定值，$dP_v=0$

故 $\cos\alpha-\sin\alpha=0$

$$\alpha=\frac{\pi}{4}$$

以上结果表明，压边圈的齿形内角 $\alpha=45°$时，（$P_{vx}+P_{vy}$）或（$\sigma_{vx}+\sigma_{vy}$）有极大值，此时精冲变形区内材料所受的静水压力最大。国外系通过大量的工艺试验才确定齿形内角 α 为 45°。

⑤ 关于 σ_z 的分析。从静水压的关系式中知 σ_z 增加也可提高静水压，但 σ_z 为模具对材料约束而引起的应力，它取决于工件的形廓，在工件轮廓内凹的部分，σ_z 值比较大，这些部分压边圈的齿形可不必沿工件轮廓线分布，就能使变形区有足够大的静水压，从而使精冲过程获得完美的结果。

（4）小结

归纳起来精冲工艺过程的特征主要是：

1）精冲从形式上看是分离工序，但实际上精冲过程中材料自始至终是塑性变形过程，工件和条料在最后分离前仍为一个整体。

2）精冲过程的塑性变形集中在狭窄的间隙区内，在其周围存在着塑性变形的影响区。

3）精冲件的剪切面如图 3.2-78 所示，为完整光洁的表面，仍有塌角和毛刺，但比普通冲裁件小。和普通冲裁件相反，精冲件凸模侧（毛刺侧）大、凹模侧（塌角侧）小，但锥度极小。



图 3.2-78 精冲件剪切面

4）剪切面表层的加工硬化沿塌角侧而增加，由表及里而降低，变形区的材料纤维沿厚度方向有很大伸长，沿径向纤维密集有压缩。

5）精冲技术中无论是工艺的力能参数、模具的几何尺寸、材料的性能和球化处理以及工艺润滑剂等，一切努力都集中围绕着一个核心问题——抑制撕裂，阻止材料在精冲完成前产生撕裂，保证塑性变形过程的进行。

众所周知，普通冲裁系通过合现间隙的选取，使材料在凸、凹模刃口处的裂纹重合，称之为控制撕裂。

可以明显地看出，精密冲裁和普通冲裁在形式上是十分类同的，但就其工艺过程的特征及制定工艺时的出发点和指导思想来说却是迥然不同的，这一点必须着重强调。

精冲时为了抑制冲裁过程中材料产生撕裂，保证塑性变形过程的进行，采取了以下措施：

1）冲裁前 V 形压边圈先压住材料，防止剪切变形区以外的材料在剪切过程中随凸模流动。

2）凸、凹模间采用极小的间隙，压边圈和反压极的夹持作用，使材料在冲裁过程中始终保持和冲裁方向垂直，避

免弯曲翘起而在变形区产生拉应力，从而构成平面应变状态下的纯剪切条件。

3）利用压边力和反压力以及最佳的V形环几何参数，提高变形区材料的球形应力张量即静水压，以提高材料的塑性。

4）材料预先进行球化处理，或采用专门适于精冲的材料。

5）采用适于不同材料的精冲工艺润滑剂。

6）必要时将凹模或凸模刃口倒以圆角，作为一种辅助措施，用来减少刃口处的应力集中，抑制或者延缓撕裂的产生，改善剪切面的质量。

10.2 精冲力的计算

精冲工艺过程是在冲裁力、压边力和反压力三者同时作用下进行的。冲裁结束，卸料力将废料从凸模上卸下来，顶件力将工件从凹模顶出，模具复位完成整个工艺过程。因此正确的计算、合理的调试和选定以上诸力，对于选用精冲压力机、模具设计、保证工件的质量以及提高模具的寿命都具有重要的意义。

1）冲裁力。精冲的冲裁力计算和普通冲裁相同（参阅本章5.1节），只是选取的系数值略高于普通冲裁。精冲的冲裁力 F_1 为

$$F_1 = f_1 L_t t \sigma_b$$

式中，f_1 为系数，考虑到精冲时由于模具的间隙小，刃口有圆角，材料处于三向压应力状态，和一般冲裁比提高了变形抗力，因此取系数 $f_1 = 0.9$；L_t 为内外周边的总长，mm；t 为材料厚度，mm；σ_b 为抗拉强度，MPa。

即

$$F_1 = 0.9 L_t t \sigma_b$$

2）压边力。V形环压边力的作用有以下三点。

① 防止剪切区以外的材料在剪切过程中随凸模流动。

② 夹持材料，在精冲过程中使材料自始至终和冲裁方向垂直而不翘起。

③ 在变形区建立三向受压应力状态。

因此正确计算和选定压边力与保证工件的剪切面质量，降低动力消耗和提高模具的使用寿命有密切的关系。

压边力 F_2 按以下经验公式计算：

$$F_2 = 2 f_2 L_e h \sigma_b$$

式中，f_2 为系数，取决于 σ_b，可由表3.2-52查得；L_e 为工件外周边长度，mm；h 为V形齿高，mm，查表3.2-63和表3.2-64；σ_b 为材料的抗拉强度，MPa。

表3.2-52 系数 f_2

σ_b/MPa	200	300	400	600	800
f_2	1.2	1.4	1.6	1.9	2.2

3）反压力。反压板的反压力也是影响精冲件质量的重要因素，它主要影响工件的尺寸精度、平面度、塌角和孔的剪切面质量。增加反压力可以改善上述质量指标，但反压力过大会增加凸模的负载，降低凸模的使用寿命。因此和压边力一样均需在实际工艺过程中，在保证工件质量的前提下尽量调到下限值。

反压力 F_3 可按以下经验公式计算：

$$F_3 = pA$$

式中，A 为工件的平面面积，mm²；p 为单位反压力，MPa，p 一般为20～70 MPa。

反压力按上式计算波动范围较大，它也可以用另一经验公式计算：

$$F_3 = 20\% F_1$$

4）总压力。在一般情况下精冲所需的总压力 F_t 为冲裁力 F_1、压边力 F_2 和反压力 F_3 之和，即

$$F_t = F_1 + F_2 + F_3$$

但是，精冲尺寸较大的工件时，往往发现用上式计算的总压力超过了精冲压力机的额定总压力，这是由于压边力在总压力中所占的比例太大，为此采取了相应的技术措施。实践表明：压边圈上的V形环压入材料的压力 F_2 远大于精冲过程中为了保证工件剪切面质量要求V形环压边圈保持的压力 F_2'，一般 $F_2' =$（30～50）% F_2。为了提高精冲压力机的有效负载能力或者降低能耗，目前多数精冲压力机的压边系统都有无级调节的自动卸压装置。精冲开始时，首先在压边力 F_2 的作用下V形环压入材料，完成压边后，压机自动卸压到预先调定的保压压边力 F_2'，然后再进行冲裁。因此实现精冲所需的总压力 F_t 是 F_1、F_2' 及 F_3 之和。即

$$F_t = F_1 + F_2' + F_3$$

5）卸料力和顶件力。精冲完闭，在滑块回程过程中不同步的完成卸料和顶件。压边圈将废料从凸模上卸下，反压板将工件从凹模内顶出。卸料力 F_4 和顶件力 F_5 按以下经验公式计算：

$$F_4 = (5 \sim 10)\% F_1$$

$$F_5 = (5 \sim 10)\% F_1$$

10.3 精冲件结构工艺性

精冲件的工艺性是指该零件在精冲过程中的难易程度。在一般情况下，影响精冲件工艺性的因素有：零件的几何形状、零件的尺寸公差和形位公差、剪切面质量、材料及厚度等，其中零件几何形状是主要影响因素。

零件几何形状对工艺性的影响称为精冲件的结构工艺性。

精冲件的几何形状在满足技术要求的前提下，应力求简单，尽可能是规则的几何形状，避免尖角。正确设计精冲件有利于提高产品质量，增加模具寿命，降低生产成本。

精冲件的尺寸极限，如最小孔径，最小槽宽等都比普通冲裁的小。这是由于精冲设备具有良好的刚性和导向精度；精冲过程的速度低、冲击小；精冲模架的刚性好导向精度高；冲切零件在压边圈、反压板无松动滑配长距离的导向和支撑下，避免了纵向失稳，提高了承载能力。因此精冲时冲切零件承受的载荷要比普通冲裁大30%～50%甚至更大，但由于上述各种有利因素，精冲件内外形轮廓的极限尺寸都比普通冲裁的小，从而有利于扩大精冲工艺的使用范围。

实现精冲的零件尺寸极限范围，主要取决于模具的强度，也和剪切面质量，模具寿命等有关。

精冲件的圆角半径、槽宽、悬臂、环宽、孔径、孔边距、齿轮模数的极限范围根据精冲的难易程度分为三级：

S_1，表示容易；

S_2，表示中等；

S_3，表示困难。

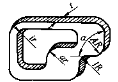
模具寿命随精冲难度的增加而降低。

在 S_3 的范围内，模具冲切零件用高速工具钢（$\sigma_{0.2}$ = 3 000 MPa）制造，被精冲的材料 $\sigma_b \leqslant 600$ MPa。

在 S_3 范围以外，一般不适于精冲。

1）圆角半径。精冲难易程度与圆角半径、料厚的关系见图3.2-79。





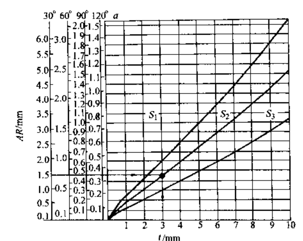


图 3.2-79 精冲难易程度与圆角半径、材料厚度的关系

精冲件内外轮廓的拐角处都必须采用圆角过渡，以保证模具的寿命和零件的质量。圆角半径在允许的范围内尽可能取得大些。它和零件的角度，零件的材料，厚度及其强度有关。

例：已知零件角度 30°，材料厚度为 3 mm，圆角半径为 1.45 mm，由图 3.2-79 查得其精冲的难易程度在 S_2 和 S_3 之间。

2）槽宽和悬臂。精冲件槽的宽度和长度，悬臂的宽度和长度，取决于零件的材料和强度，应该尽可能增大它的宽度，减小它的长度，借以提高模具的寿命。

精冲难易程度与槽宽、悬臂和料厚的关系见图 3.2-80。

例：已知零件槽宽 a 悬臂 b 为 4 mm，材料厚度 5 mm，由图 3.2-80 查得其加工难易程度为 S_3。

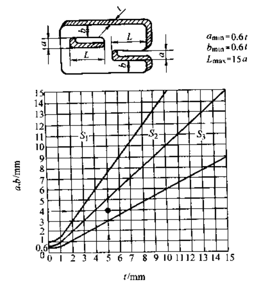


图 3.2-80 精冲难易程度与槽宽、悬臂和料厚的关系

3）环宽。精冲难易程度与环宽和料厚的关系见图 3.2-81。

例：已知零件环宽 6 mm，材料厚度 6 mm，由图 3.2-81 查得其加工难易程度在 S_2 和 S_3 之间。

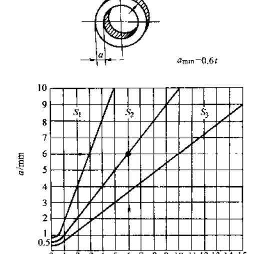


图 3.2-81 精冲难易程度与环宽和料厚的关系

4）孔径和孔边距。精冲难易程度与孔径，孔边距和料厚的关系见图 3.2-82。

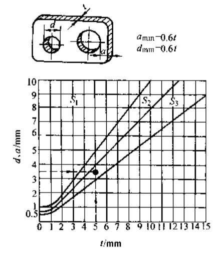


图 3.2-82 精冲难易程度与孔径、孔边距和料厚的关系

例：已知零件孔径 3.5 mm，材料厚度 5 mm，由图 3.2-82 查得其精冲难易程度为 S_3。

5）齿轮模板。精冲难易程度与齿轮模板和料厚的关系见图 3.2-83。

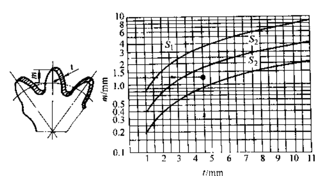


图 3.2-83 精冲难易程度与齿轮模板和料厚的关系



例：已知齿轮模板1.4，材料厚度4.5mm，由图3.2-83查得其难易程度为S_3。

6）半冲孔相对深度。半冲孔时，冲孔凸模进入材料的深度h和材料厚度t之比定义为半冲孔相对深度c，$c=h/t$，它是衡量半冲孔变形程度的指标，见图3.2-84。

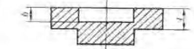


图3.2-84 半冲孔

低碳钢的半冲孔极限相对深度$C_0=70\%$，详见本章第10.4小节。

10.4 精冲复合工艺

精冲和其他工艺的复合简称精冲复合工艺，包括两种形式：一种是精冲作为精锻、冷挤、拉深等工艺的后续工序；另一种是充分利用精冲压力机具有三种独立可调压力的特点，在精冲过程中（通过复合模或连续模）和其他工艺（包括半冲孔、挤压、压扁、压印、弯曲和压沉头等工艺）的复合。

精冲复合工艺是精冲工艺的发展和延伸。就产品对象而言，已从等厚度的精冲发展到不等厚度的精冲件，尺寸关系和公差要求从二维发展到三维；就工艺而言，已从板料的单一分离工艺发展为成形-分离复合工艺。许多原来由铸、锻毛坯切削加工的零件以及由切削加工后铆、焊组装的零件都可能用精冲复合工艺来加工。

精冲复合工艺具有十分显著的技术经济效果，是取代切削加工的一种很有发展前途的工艺。

（1）半冲孔

半冲孔工艺是精冲复合工艺中最具特色和简单易行的一种。

1）半冲孔工艺过程分析。在普通冲裁过程中，当凸模进入材料厚度1/3左右时，工件就已经和条料分离。显然在这种情况下根本不可能采用半冲孔工艺。半冲孔工艺是利用精冲工艺在冲裁过程中工件和条料始终保持为整体之一特点而派生出来的一种新工艺。其变形过程和零件轮廓附近有齿圈压边的精冲过程是基本类同的，如图3.2-85所示。虽然半冲孔的周边没有齿圈压边，但半冲孔的变形部位距工件边缘较远，外部材料的刚端作用及精冲件外围齿圈的压边作用，可以防止半冲孔剪切区以外的材料在变形过程中随凸模流动。凸凹模和反压板、半冲孔凸模和顶杆的夹持作用，使材料在半冲孔过程中始终保持和冲裁方向垂直而不翘起。再由于半冲孔凸模和凹模之间的小间隙，构成了变形区纯剪切的条件，另外，在半冲孔凸模、顶杆、凸凹模和反压板的强压作用下，半冲孔变形区的材料处于三向受压的应力状态，提高了材料的塑性，避免了精冲半冲孔零件的凸台部分和本体分离或产生撕裂。

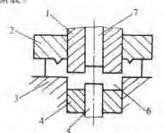


图3.2-85 精冲半冲孔复合工艺过程示意图
1—凸凹模；2—V形环压边圈；3—凹模；4—反压板；5—半冲孔凸模；6—工件；7—顶杆

图3.2-86为半冲孔变形区金属的宏观流线照片。可以看出，虽然半冲孔凸模进入材料超过3/4厚度，变形区的材料产生了剧烈的变形，但凸台和本体部分仍然保持为一个整体。



图3.2-86 半冲孔变形区金属的宏观流线照片

2）半冲孔相对深度c。在半冲孔过程中，半冲孔凸模进入材料的深度h和材料厚度t之比，定义为半冲孔相对深度，见图3.2-87，它是衡量半冲孔变形程度的指标：

$$c=\frac{h}{t}$$

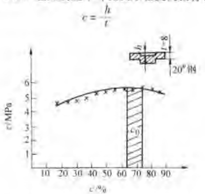


图3.2-87 半冲孔相对深度c和连接处抗剪强度τ的关系
试样材料：20钢 $\sigma_b=400$ MPa 料厚$t=8$ mm
半冲孔凸、凹模间隙0.03 mm

半冲孔的c值和凸台同本体连接处的抗剪强度τ之间的关系示于图3.2-87。对于塑性较好的材料，在c值很大、$t-h$很薄的情况下，凸台和本体仍为一个整体，并保持一定的强度。但是考虑到连接部分的材料由于变形剧烈硬化而变脆，在冲击载荷下凸台和本体有分离的危险，因此推荐软钢的半冲孔极限相对深度$c_0=70\%$，视零件结构，一般可在65%～75%之间取值，如图3.2-87所示。

3）精冲半冲孔复合工艺实例。图3.2-88所示为几种典型的精冲半冲孔零件。

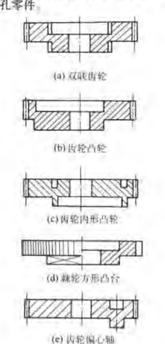


图3.2-88 精冲半冲孔零件

半冲孔工艺既可将各种异形凸台（包括齿轮）附在任何形状的平面零件上，也可将异形盲孔（包括内齿）附在任何形状的平面零件上，此时只需要将相应的凸台部分机加工去掉即可。由此可见半冲孔工艺还具有另外一种独特的功能，如可以十分方便地在零件上加工出各种异形盲孔，这对于一般机械加工而言是非常困难的。

图 3.2-89b 和图 3.2-90b 所示是由两个精冲半冲孔件组成的零件，这类零件一般适合于较大的零件，它是铸、锻件精冲化的典型实例。

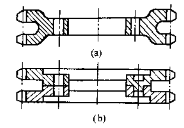
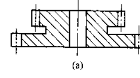


图 3.2-89　精冲半冲孔组合件



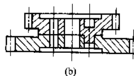


图 3.2-90　精冲半冲孔组合件

图 3.2-89a 为链轮零件原来的结构形状，它采用铸造或锻造毛坯，通过多道机加工工序完成。而图 3.2-89b 是由两个精冲半冲孔件组成的零件，两个零件各只需一道精冲工序完成，且两件共用一套模具，其中一件只需将冲孔凸模相应地减短即可。

图 3.2-90a 为原来的双联齿轮零件结构形状，它同样采用铸造或锻造毛坯，通过多道机加工工序完成，而图 3.2-90b，也是由两个精冲半冲孔件组成的零件。

实践表明：精冲半冲孔组合件具有原结构零件相同的功能，取代后者，在技术上是完全可行的，但是和传统工艺相比，新工艺都可以大幅度地提高生产效率，降低生产成本。

此外，以上实例还表明，对于许多扁平类形状的零件，都有可能用相应的精冲半冲孔件来组合。

精冲件组合时，连接的方式除采用螺栓、铆钉及点焊等常用的方法以外，还采用精冲件本身的凸台代替铆钉进行铆接，如图 3.2-91 所示。

(2) 挤压、模锻凸台

1) 精冲和挤压的复合。图 3.2-92 为精冲挤压复合工艺过程示意图，主要通过挤压凸模 6 和凸凹模上的凹模形腔来实现正挤压过程，而外形的精冲和一般精冲完全一样。在模具结构上，挤压凸模 6 必须低于凹模 4，以保证外形精冲后挤压凸台和工件之间有足够的连接厚度。

精冲时的挤压许用变形程度必须比普通挤压低，这是由于精冲挤压时，挤压凸模四周是被凸凹模和反压板夹持的精冲坯料本身，即在精冲坯料上施加较大的反压力。它的刚性也远不如一般的挤压凹模，因此挤压凸模下面的材料，只能被认为处于半封闭状态。当挤压的变形程度超过某一数值时，挤压凸模下面的材料，除了挤入凸凹模的凹模孔内，还向四周流动，这是制定精冲挤压复合工艺时必须考虑的。

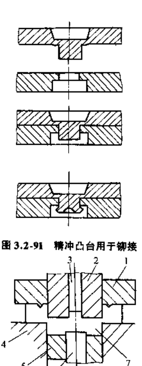


图 3.2-91　精冲凸台用于铆接

图 3.2-92　精冲挤压复合工艺过程示意图
1—齿形压边圈；2—凸凹模；3—顶杆；4—凹模；5—反压板；6—挤压凸模；7—工件

精冲挤压复合工艺主要用于加固凸台和本体的连接以及增加凸台的高度。根据材料转移体积相等的原理计算，少量增加挤压凸、凹直径之差，就能使凸台高度显著增加。当产品要求的凸台高度超过半冲孔的极限变形程度时，可采用挤压方案增加凸台高度，应合理地选择挤压凸模直径，既要使工件的凸台高度满足图纸要求，又必须保证凸台和本体间有足够的连接厚度。

2) 精冲和模锻的复合。图 3.2-93 为精冲封闭模锻复合工艺过程示意图。外形精冲和一般精冲相同，内形封闭模锻由凸凹模的凹模孔和顶杆端面构成成形模腔，通过成形凸模加压来实现。精冲模锻复合工艺必须先开始外形精冲后进行内形的体积成形。

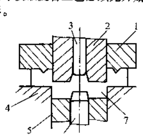


图 3.2-93　精冲模锻复合工艺过程示意图
1—V 形环压边圈；2—凸凹模；3—顶杆；4—凹模；5—反压板；6—成形凸模；7—工件

体积成形过程类似于一般的封闭模锻，需要遵循体积不变条件来考虑模具有关部分的尺寸，即被成形凸模挤压而转移的材料应与充满成形模腔的材料体积相等。

精冲模锻复合工艺成形的材料也是处于半封闭状态，比压过高时，材料同样也有向四周转移的可能。

(3) 压印

压印系指在工件的表面上压出较浅的凹凸花纹，凹下和凸起量一般为 0.1～0.3 mm，硬币、标牌和证章等均是压印的典型产品。



精冲压印复合工艺示于图 3.2-94。外轮廓精冲内表面压印，在复合模上一次冲压成形。

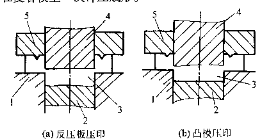


图 3.2-94 精冲压印复合工艺过程示意图
1—凹模；2—反压板；3—工件；4—凸模；5—V 形环压边圈

压印所需压力按下式计算

$$P = Fq$$

式中，P 为压印所需的压力，N；F 为压印部位的投影面积，mm^2；q 为压印所需的单位面积压力，MPa。

q 值与压印的方式和压印的材料等因素有关。

压印凹下的线条时，q 值按压印材料的屈服强度取值，取 $q = \sigma_s$。压印凸起的线条或起伏的花纹时，q 值参数表 3.2-53 确定。

表 3.2-53 压印单位面积压力

情况	q/MPa
$t < 1.8$ mm 黄铜板	800 ~ 900
低碳钢	1 500 ~ 2 000
银或镍	1 500 ~ 1 800
不锈钢	2 500 ~ 3 000

压印面放在工件的塌角侧时，由反压板压印，如图 3.2-94a 所示；压印面放在工件的毛刺侧时，由凸模压印，如图 3.2-94b 所示。应尽可能采用反压板压印，以利于模具的刃磨和维修。

显然，无论是用反压板压印还是用凸模压印，都必须使反压力大于压印力，才能使精冲和压印复合。

应该指出，普通压印既要求压床的刚性好、封闭高度的重复精度高（多数用精压机），又要求材料的厚度公差严，否则会影响压印的质量和模具的寿命。而精冲压印复合工艺，材料在凸模和反压板之间完成压印后，继续在凸模和反压板夹持下进行外形的精冲，因此对材料厚度公差无严格要求，且压印质量好，模具寿命高，生产效率高，充分发挥了精冲技术的优势。

（4）压扁

精冲压扁复合工艺是获得不等厚精冲件的另一种方法，一般在连续模上进行，如图 3.2-95 所示。首先冲出定位孔，通过定位销保证每一工步的送料精度；其次需要在条料局部压扁的周围预先切口，以便材料压扁时易于流动。由于局部

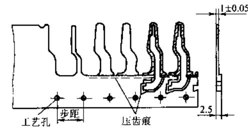


图 3.2-95 精冲压扁复合工艺

压扁要比将条料局部变厚容易实现，因此在多数情况下，条料的厚度按工件的最大厚度来选取，工件的其他厚度通过压扁来获得。

由于压扁精冲是在连续模上进行，材料经压扁硬化后不可能进行退火，因此压扁精冲一般只适于硬化指数较低的低碳钢等材料。

压扁精冲工艺的技术关键主要是压扁后材料的硬化对后续精冲表面质量的影响。图 3.2-96 给出了 20 钢的相对压扁量$\left(\frac{t-t_1}{t}\times 100\%\right)$与加工硬化的关系。材料的厚度和强度（硬度）是制定这种精冲工艺方案以及设计精冲模具的主要原始数据。

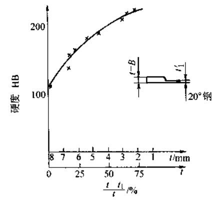


图 3.2-96 20 钢相对压扁量

（5）弯曲

精冲弯曲复合工艺的关键是如何根据零件弯曲形状特征、技术要求、生产批量来选择复合的形式，进而确定模具的结构。

1）精冲和弯曲同时进行。精冲和弯曲同时进行采用的是精冲弯曲复合模。

① 切口弯曲。切口弯曲可弯锐角、直角和其他形状，比较容易和精冲复合同时进行，既可实现内形弯曲如图 3.2-97a、b，也可实现外形弯曲如图 3.2-97c 所示。

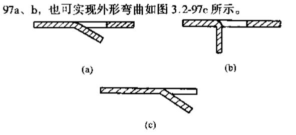


图 3.2-97 精冲切口弯曲复合工艺

② 浅 Z 形弯曲。对于弯曲高度 $h < t$，弯曲角度 $\alpha < 75°$ 的 Z 形弯曲件，也可以采取精冲和弯曲同时进行的方案，如图 3.2-98 所示。精冲弯曲复合模的凸模和反压板按工件弯曲形廓制造，压边圈和凹模保持平面形状。

从图 3.2-98 可以看出，采用平直的条料，通过精冲弯曲复合模一次冲压生产出精冲弯曲零件的必要条件是反压力必须大于弯曲力。又由于精冲要求先压边后精冲，即压边圈必须高出凸模一定的距离，采用图 3.2-98 结构，不能同时满足上述条件，合模时条料在反压板作用下被压入压边圈出现了冲裁，见图 3.2-98b，行程继续，弯曲和冲裁同时进行，最后凸模和反压板压靠完成弯曲和部分精冲，见图 3.2-98c，反压板在凸模推动下后退直至完成精冲见图 3.2-98d。从图 b 可以看出，模具闭合材料已被四周的压边圈和凹模夹紧，而此时工件的弯曲尚未完成，弯曲继续进行时，材料向内转移受到四周压边的限制，将在剪切区产生拉应力甚至撕裂，降

低剪切面质量。这是此方案的主要缺点，但是这种结构采取平直的压边圈和凹模，不仅制造和维修方便，而且精冲后的废料仍保持平直有利于自动送料。

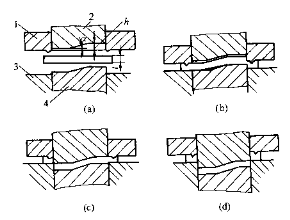


图 3.2-98　精冲和弯曲同时进行过程示意图

1—齿形压边圈；2—凸模；3—凹模；4—反压板；
t—料厚；h—弯曲高度；α—弯曲角度

2）先弯曲后精冲。先弯曲后精冲的复合模如图 3.2-99 所示。图 a 为模具开启，图 b 为模具闭合。复合模的压边圈和凹模，反压板和凸模分别按零件的内外形廓制造，即闭合时压边圈和凹模反压板和凸模之间的距高都相隔一个料厚，但应该注意的是不能使凸模和凹模闭合时其刃口之间也相隔一个料厚，否则精冲时凸模必须进入凹模一段距离 Δy

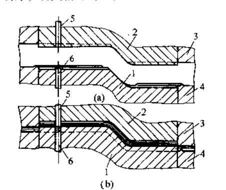


图 3.2-99　先弯曲后精冲复合模示意图

1—凸模；2—反压板；3—凹模；4—V 形环压边圈；
5—冲孔凸模；6—顶杆

$\left[\Delta y=\left(\frac{1}{\cos\alpha}-1\right)t\right]$，才能使材料的斜边分离。正确的设计应该是模具闭合时，使凸模和凹模的平刃口和斜口都相切合缝，条料完成弯曲精冲时可防止凸模进入凹模。

先弯曲后精冲的零件弯曲区剪切的质量不高，但大多零件弯曲区剪切面都不是工作表面，不要求高的剪切面质量。用这种方法生产的弯曲精冲件和采用先精冲后弯曲生产的零件相比，前者在弯曲二侧有关的内外形尺寸可以更精确。

3）先精冲后弯曲。先精冲后弯曲有二种方案，一种方案是采用连续模完成，图 3.2-100 所示为连续模上的工步示意图。另一种方案是完成精冲后再用单工序弯曲模完成弯曲。两种方案的比较，除了成本分析以外还要考虑弯曲件给自动送料和自动出件带来的不利影响。多数情况下，将精冲和弯曲分开进行更简便可靠。图 3.2-100 中的工件当然也可采用后一方案完成。

图 3.2-101 所示三维精冲件也是采用后一方案完成的。工件完成了精冲、挤压、压扁、压印等工序后，最后再进行弯曲，完成三维精冲件加工。

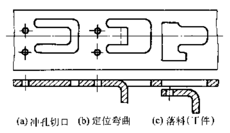


图 3.2-100　精冲弯曲连续模工步图

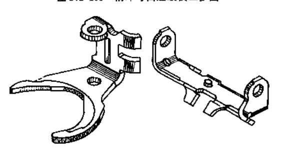


图 3.2-101　典型三维精冲件

（6）压沉孔

精冲可以和压沉孔工艺复合。根据不同的沉孔形式和沉孔的深度以及沉孔的部位，需采不同的工序如表 3.2-54 所示。

表 3.2-54　压沉孔工艺

沉孔形式		圆锥形			
沉孔深度		25% t①		40% t①	
沉孔部位		塌角面	毛刺面	毛刺面	塌角面
工序	名称	1）落料、冲孔、压沉头	1）冲孔、压沉头	1）压沉孔	1）压沉孔
	简图				
	名称		2）落料	2）冲孔	2）落料、冲孔
	简图				



续表 3.2-54

沉孔形式		圆锥形			
沉孔深度		$25\%t$①		$40\%t$①	
沉孔部位		塌角面	毛刺面	毛刺面	塌角面
工序	名称			3）落料	
工序	简图				
模具		复合模	连续模	连续模	连续模
沉孔形式		圆锥形		圆柱形	
沉孔深度		$60\%t$①		$60\%t$①	
沉孔部位		毛刺面	塌角面	毛刺面	塌角面
工序	名称	1）冲孔	1）冲孔	1）冲孔	1）冲孔
工序	简图				
工序	名称	2）压沉孔	2）压沉冲	2）压沉孔	2）压沉孔
工序	简图				
工序	名称	3）冲孔	3）落料、冲孔	3）冲孔	3）落料、冲孔
工序	简图				
工序	名称	4）落料		4）落料	
工序	简图				
模具		连续模	连续模	连续模	连续模

① t 为板料厚度。

(7) 三维精冲件

三维精冲件是指零件的尺寸关系和公差要求是三维的，区别于一般精冲件其尺寸关系和公差要求基本上是在二维的平面内。

图 3.2-101 所示为二个典型的三维精冲件，采用了精冲、挤压、翻边、压印、压肋、半冲孔和弯曲等复合工艺，这些零件的技术要求为

材料强度 σ_b：640 ~ 880 MPa

剪切面粗糙度：R_a0.8 ~ 0.4 μm

尺寸公差：IT8 ~ IT7 级

两孔同轴度：0.05 mm

弯曲角度偏差：±10′

三维精冲件是精冲复合工艺发展的产物，它使精冲件由二维扁平类零件扩展到三维空间尺寸要求的零件，扩大了精冲技术的应用范围。

和铸、锻毛坯切削加工件相比，三维精冲件结构紧凑，重量轻，强度高且制造成本低、制造周期短，是替代传统的切削加工的先进制造技术，具有广阔的发展前途。

10.5 精冲件质量及影响因素

(1) 尺寸公差

精冲件可达到的尺寸公差取决于以下因素：模具的制造公差、刃口状态、压力机、润滑剂、工件材料的种类、金相组织和厚度以及精冲件几何形状的复杂程度。根据 JB/T 9175.2—1999 精密冲裁件质量标准的规定，精冲件可达到的尺寸公差见表 3.2-55。它综合了精冲技术和模具制造技术的水平，是目前精冲工艺实际达到的经济公差，因此它是设计精冲零件、编制精冲工艺和设计精冲模具的重要依据。但是表 3.2-55 中数据并不能反映精冲件尺寸的散布规律以及精冲件尺寸和模具尺寸的关系。

表 3.2-55 精冲件可达到的尺寸公差等级

材料厚度/mm	抗拉强度极限 600 MPa		
	内形 IT	外形 IT	孔距 IT
0.5 ~ 1	6 ~ 7	7	7
1 ~ 2	7	7	7
2 ~ 3	7	7	7
3 ~ 4	7	8	7
4 ~ 5	7 ~ 8	8	8
5 ~ 6.3	8	9	8
6.3 ~ 8	8 ~ 9	9	8
8 ~ 10	9 ~ 10	10	8
10 ~ 12.5	9 ~ 10	10	9
12.5 ~ 16	10 ~ 11	10	9

图 3.2-102 给出了两组精冲试样尺寸的散布图。图中 0 点为凹模某一直径方向的实际尺寸，横坐标 x_i 为尺寸组中心，即各组边界的平均值，纵坐标 ϕ_{x_i} 为概率密度，ε 表示系统误差。试样尺寸均按相应的同一部位量得，即排除了模具制造误差的影响。

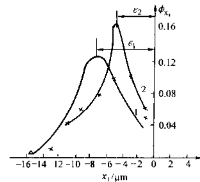


图 3.2-102 精冲试样尺寸散布图

材料：20 钢 直径 20 mm

1—料厚 8 mm 间隙 0.057 mm 压边力 82 kN 反压力 30 kN;

2—料厚 4 mm 间隙 0.027 mm 压边力 38 kN 反压力 15 kN

图 3.2-102 表明：

1）精冲零件的尺寸散布基本符合正态分布规律。

2）尺寸的散布范围窄，精度高，定量地说明了精冲件尺寸一致性好，4 mm 厚软钢精冲件极限偏差为 10.6 μm，达到标准公差 IT6 级；8 mm 厚零件极限偏差为 19.1 μm，达到标准公差 IT7 级。

3）二组尺寸全部小于凹模尺寸（定凹模尺寸为 0 点），其系统误差 ε 分别等于 −5 μm 和 −7 μm。

比较表 3.2-54 和图 3.2-102，可以看出两者的差别，约相差二个标准公差等级。

应强调指出，在实际制定精冲工艺方案或设计精冲模具时，必须充分理解上述差别的含义，前者是规定的经济公差，后者是可能达到的极限偏差，应灵活运用表 3.2-54 而不受其限制。例如已知模具工作零件的实际尺寸，参照图 3.2-102 可以知道精冲实际能够达到的尺寸公差；反之，在给定的精冲件尺寸公差高于表 3.2-54 所规定的等级时，可参照图 3.2-102 分析所需模具工作零件的尺寸公差等级，进而确定该种零件实现精冲的可能性。

（2）剪切面质量

精冲剪切面质量包括表面粗糙度，表面完好率和允许的撕裂等级三项内容。

精冲时可达到的剪切面粗糙度，取决于以下因素：工作零件的表面粗糙度、刃口状态、润滑条件、压力机和工件材料的种类、金相组织及厚度。

精冲件的剪切面粗糙度根据 GB/T 131—1993 规定，用轮廓算术平均偏差 R_a 值评定。

精冲件可达到的剪切面粗糙度为 R_a3.6 ~ 0.2 μm，一般为 R_a2.5 ~ 0.63 μm。

精冲件剪切面状况及其采用符号的意义示于图 3.2-103。

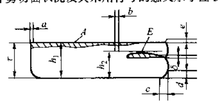


图 3.2-103 剪切面状况符号意义

图中，t 为材料厚度；h_1 为剪切终端存在表层剥落时，光洁剪切面最小部分占材料厚度的百分比；h_2 为剪切终端标在鳞状表层剥落时，光洁剪切面最小部分占材料厚度的百分比；b 为最大允许的鳞状表层剥落宽度（所有 b 的总和不得大于相关轮廓部分的 10%）；a 为允许的表层剥落深度；e 为毛刺高度；c 为塌角宽度；d 为塌角深度；δ 为撕裂带的最大宽度；E 为撕裂带；A 为剪切终端表层剥落带。

JB/T 9175.2—1999 规定表面完好率分五个等级，列于表 3.2-56，允许的撕裂分四个等级，列于表 3.2-57。

表 3.2-56 精冲件表面完好率等级

级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
h_1/%	100	100	90	75	50
h_2/%	100	90	75	—	—

表 3.2-57 精冲件允许的撕裂等级

级别	1	2	3	4
δ/mm	0.3	0.6	1	2

关于精冲件剪切面粗糙度的代号，用 JB/T 9175.2—1999 中的符号表示。

精冲件剪切面质量标注实例示于图 3.2-104。

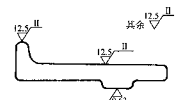


图 3.2-104 剪切面质量标注实例

在实际生产中，建议采用标准样件作为评定精冲件表面完好率和允许撕裂的依据，标准样件由企业组织生产的有关部门从试冲的零件中选定，供需双方确认。

1）影响表面粗糙度的因素。凸凹模的表面粗糙度和刃口状态是影响剪切面表面粗糙度的主要因素，模具工作表面的 R_a 值越小，工件剪切面的 R_a 值也相应减小。虽然电加工在模具表面产生的纵向波纹不会反映在精冲件的剪切面上，即此时工件的 R_a 值小于模具的 R_a 值，但是仍需仔细研磨光刃口上电加工留下的痕迹，防止它在工件的剪切面上产生划痕。

润滑剂也是影响剪切面粗糙度的重要因素。良好的润滑剂形成一种耐压耐温的薄膜附着在金属表面上，将新生的剪切面和模具工作表面隔开，借以减少摩擦，散发热量，达到提高模具寿命和剪切面质量的目的。反之，如果润滑剂在高压下被挤走，或在高温下分解挥发，结果剪切面和模具工作表面在高温高压下直接接触，相对滑动，将产生干摩擦，容易引起"焊合"，导致模具的黏着磨损和工件剪切面擦伤，使 R_a 值增加。

在目前采用的精冲速度范围内，冲裁速度本身不会直接影响剪切面的粗糙度。冲裁速度主要通过精冲的变形功和摩擦功产生的热量而对剪切面质量产生影响。当材料较厚而精冲速度又较高时，如不采取强制冷却和有效润滑，很容易产生"焊合"现象。冲裁速度、材质和料厚、润滑剂三者是围绕着精冲变形热而互相影响、相互制约的。强度高且料厚的材料宜采用较低的冲裁速度。

当模具工作表面的粗糙度和润滑条件一定时，材料的强

度和厚度对剪切面 R_a 值的影响示于图 3.2-105。

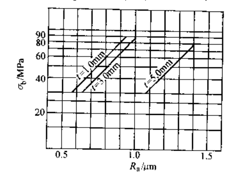


图 3.2-105 剪切面 R_a 值与材料的 σ_b 和材料厚度 t 的关系

2）影响表面完好率的因素。前已阐明，精冲时剪切变形区材料的塑性流动而引起的加工硬化沿厚度方向增加，在工件的毛刺侧附近达到最高值，此时材料的塑性将沿厚度方向而逐渐降低，最后如果塑性过低就会出现表层剥落。JB/T 9175.2—1999 规定用剪切终端表层剥落的多少来确定表面完好率的等级。因此影响表面完好率的因素实际上是影响剪切终端表层剥落的因素，包括冲裁间隙、压边圈齿形参数、刃口圆角、压边力、反压力、搭边以及原材料等。其中冲裁间隙是影响表面完好率的主要因素。

分析间隙的影响时，不能静止地看待问题（间隙和原始厚度的关系），而应该从精冲过程中瞬时料厚和间隙的关系来分析问题，称间隙和瞬时厚度之比为瞬时间隙。显然，瞬时间隙随精冲过程的进行而逐渐增加。建立瞬时间隙的概念，有利于分析精冲过程及其对剪切终端表层剥落的影响。

综合以上分析表明精冲是不定常的过程，无论是材料的塑性和模具的瞬时间隙在精冲过程中都是变化的，而且是材料的塑性不断降低，瞬时间隙不断增大。这种不利于精冲过程的变化趋势是精冲工艺本身的特点所决定的，正因为如此，对于每一种材料都存在精冲的极限厚度，详见本章9.6节。

冲裁间隙、刃口圆角、压边力、反压力及搭边对表面完好率的影响分别示于图 3.2-106～图 3.2-111。

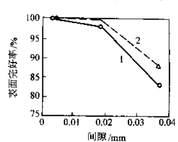


图 3.2-106 间隙对表面完好率的影响

材料 20 钢，厚 3.2 mm，直径 16 mm，反压力 56 kN

1—压边力 20 kN；2—压边力 40 kN

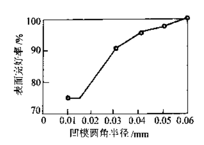


图 3.2-107 凹模刃口圆角的影响

材料 20 钢，厚 3.3 mm，直径 16 mm，

冲裁间隙 1.2%t，压边力 20 kN，无反压

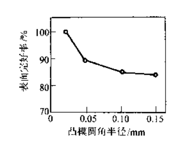


图 3.2-108 凸模刃口圆角的影响

材料 20 钢，厚 3.3 mm，直径 16 mm，凹模刃口圆角，

半径 R_d0.01 mm，冲裁间隙 1.2%t，压边力 20 kN，无反压

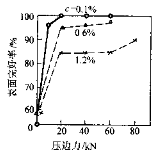


图 3.2-109 压边力的影响

材料 20 钢，厚 3.2 mm，直径 16 mm，无反压

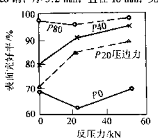


图 3.2-110 反压力的影响

材料 45 钢，厚 2.9 mm，直径 16 mm，间隙 1.2%t

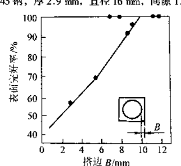


图 3.2-111 搭边值的影响

材料 20 钢，厚 3.1 mm，间隙 0.1%t

（3）剪切面垂直度

精冲件剪切面呈倒锥现象是精冲的特征之一，它是精冲过程中材料随模具刃口流动又始终保持为一个整体面产生的。

图 3.2-112 给出了可达到的剪切面垂直度公差，一般内形的垂直度比外形的高。

剪切面垂直度和材料厚度、强度、模具结构、刃口状态以及力能参数有关。

采用双齿圈有利于提高剪切面的垂直度。

（4）平面度

精冲过程中，V 形环压入材料在压边圈和凹模、反压板和凸模强力夹持下进行，本身就具有校平作用，因此精冲件具有较高的平面度。图 3.2-113 所示为一般条件下精冲件每 100 mm 距离上的平面度公差。

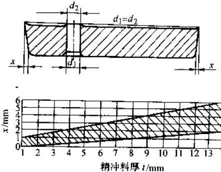


图 3.2-112 精冲件剪切面垂直度公差

图 3.2-113 精冲件的平面度公差

精冲件的平面度与材料厚度、原始的平面度、内部的残余应力、力学性能及精冲工艺的力能参数有关。增加反压力对改善平面度效果显著。此外厚度厚、强度低、压边力大都对改善平面度有利。

(5) 塌角和毛刺

精冲件存在塌角和毛刺，但都比普通冲裁件小。

1) 塌角。在给定材料厚度和材料种类的条件下，圆角半径 R 和夹角 α 越小，塌角的宽度 c 和深度 d 越大。如果给定零件的圆角半径和夹角，则减小材料厚度和提高强度，会使塌角的深度和宽度减小。

图 3.2-114 给出了最小允许圆角处最大塌角的标准值。适用于 σ_b 在 450 MPa 以下的材料。

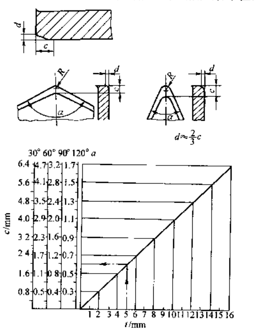


图 3.2-114 精冲件夹角、厚度和塌角的关系

2) 毛刺。毛刺产生在凸模侧，其大小和模具刃口状态，磨损程度以及工件的轮廓形状有关。图 3.2-115 给出了凸模刃口圆角半径对毛刺高度的影响。

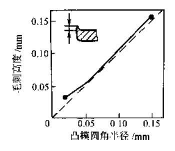


图 3.2-115 凸模刃口圆角半径对毛刺高度的影响

材料 20 钢，厚 3.3 mm，凹模直径 16 mm，
凹模刃口圆角半径 0.01 mm，间隙 1.2% t，
压边力 40 kN，无反压力

精冲时凸模进入凹模会增加毛刺的高度，生产中应严格控制封闭高度，使凸模的进入量最大不超过凹模的圆角半径。

(6) 精冲件缺陷原因及其消除方法

精冲零件常见的缺陷，产生的原因及消除方法列于表 3.2-58。

表 3.2-58 缺陷形态、原因及消除方法

缺陷形态	产生原因	消除方法
表面质量差	1) 材料不合适 2) 凹模孔表面粗糙 3) 润滑不充分 4) 润滑剂不合适 5) 凹模圆角半径大小	1) 球化退火或更换材料 2) 当凸、凹模间隙允许时研磨凹模孔 3) 改进润滑结构 4) 更换润滑剂 5) 适当增大凹模圆角半径
中间撕裂带	1) 压边力太小 2) 凹模圆角太小或不均匀 3) 材料不合适 4) 搭边太小 5) 压边圈齿形参数不合适 6) 零件拐角半角太小	1) 增大压边力 2) 修正凹模圆角半径 3) 球化退火或更换材料 4) 增加送料长度或增加条料宽度 5) 修正齿形参数或双面压齿 6) 适当加大拐角处凹模圆角半径或在该处采用双面压齿
剪切终端表层剥落	凸模和凹模的间隙太大	重新制造凸模或凹模减小间隙
剪切面呈现不正常锥形	1) 凹模圆角半径太大 2) 凹模弹性变形	1) 重磨凹模刃口，减小圆角半径 2) 镶拼凹模增加预压量，整体凹模增加预紧套

续表 3.2-58

缺陷形态	产生原因	消除方法
工件靠凸模侧存毛边剪切面呈锥形	凸模与凹模的间隙太小	增加凸模与凹模的间隙（加工特殊性质的材料时，即使间隙合适也可能出现一定程度的毛边）
剪切面呈波纹状和锥形凸模侧剪切周边有毛边	1）凹模圆角半径太大 2）凸模与凹模间隙太小	1）重磨凹模、减小圆角半径 2）重新加工凸模以增加凸模与凹模的间隙
剪切面带波纹状，剪切终端表层剥落	1）凹模圆角半径太大 2）凸模和凹模的间隙太大	1）重磨凹模、减小圆角半径 2）重新制造凸模或凹模减小间隙
工件毛刺过大	1）凸模与凹模间隙太小，凸模刃口已钝 2）凸模与凹模间隙合适，凸模刃口已钝 3）凸模进入凹模太深	1）增加间隙重磨凸模 2）重磨凸模 3）增加封闭高度
一侧剪切终端表层剥落另一侧呈波纹状有毛边	1）凸模和凹模间隙不均 2）凸模与压边圈缝隙太大	1）调整凸模和凹模间隙 2）修正压边圈缝隙
塌角过大	1）凹模圆角太大 2）反压力太小 3）工件轮廓上拐角的夹角太小	1）重磨凹模，减小圆角半径 2）增加反压力 3）采用双面齿
工件不平中间拱起	1）反压力太小 2）凸模表面存油太多	1）增加反压力 2）V形环上升溢油槽

10.6 精冲材料及工艺润滑

（1）精冲材料

大约95%的精冲件是钢件，其中大部分是低碳钢，适于精冲的主要钢种列于表3.2-59。

表 3.2-59 适于精冲的主要钢种

材料	可精冲的大约最大厚度/mm	精冲适应性①	材料	可精冲的大约最大厚度/mm	精冲适应性①
08	15	1	50	6	2
10	15	1	55	6	2
15	12	1	60	4	2
20	10	1	70	3	3
25	10	1	T8A	3	3
30	10	1	T10A	3	3
35	8	2	15Mn	8	2
40	7	2	16Mn	8	2
45	7	2	15CrMn	5	2
20MnMo	8	2	0Cr13	6	2
20CrMo	4	2	1Cr13	5	2
GCr15	6	3	4Cr13	4	2
1Cr18Ni9	8	2			

① 1—理想的精冲材料；2—适合的精冲材料；3—精冲困难的材料。

未列入表中的钢种，可参照表中含碳量接近的钢种，但对于含硫、磷较高的非镇静钢，即使是低碳钢，精冲时也会出现问题，选材时需慎重。表3.2-59中第二项，可精冲的大约最大厚度是一个范围，它与材料组织，工件的技术要求有关。钢材以球化完全、弥散良好、分布均匀的细球状碳化物组织为最佳。由于球化处理需要增加成本，实际生产中应根据零件形状的复杂程度和剪切面质量级别合理地选用相应的材料组织。在满足零件技术要求的前提下应选用最便宜的材料，以求得技术和经济的统一。

适于精冲的钢和铜合金、铝和铝合金列于表3.2-60。

表 3.2-60 铜及铜合金、铝和铝合金的精冲适应性

材 料	精冲适应性①
T2，T3，T4，TU1，TU2	1
H96，H90，H80，H70，H68	1
H62	2
HSn70-1，HSn62-1	2
HNi65-5	2
QSn4-3	2
QBe2，QBe1.7	3
QA17	2
1070A，1060，1050A，1035，1200，8A06	1
3A21	1
5A02，5A03	2
2A11，2A12	2

① 同表3.2-59注。

（2）精冲工艺润滑

精冲工艺润滑是实现精冲的四个条件之一，它与模具寿命和工件质量密切相关，直接影响精冲的技术经济效果，在精冲技术领域占有重要的位置。

精冲过程中金属材料在三向受压的条件下进行塑性剪切变形，新生的剪切面和模具工作表面之间发生强烈的摩擦并



产生局部高温（因塑性变形和外摩擦而引起）。在这种条件下金属材料与模具工作表面之间产生干摩擦，容易引起“焊合”和附着磨损。采用润滑剂则可形成一层耐压耐温的坚韧润滑薄膜附着在金属表面上，将新生的剪切面和模具工作表面隔开，借以改善材料与模具间的润滑条件，减少摩擦，散发热量。从而达到提高模具寿命，稳定工件剪切面质量的目的。

1）润滑状态

① 精冲工艺过程无论是润滑充分（图 3.2-116b）或润滑不充分（图 3.2-116a），剪切面润滑剂的覆盖情况沿厚度总是变化的，从塌边侧到毛刺侧，先充分而逐渐减弱，这种由多到少递减的润滑特征叫做“刮腻子”式的润滑，示于图 3.2-116。

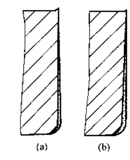


图 3.2-116　精冲工艺过程的润滑特征

② 条料较厚而润滑不充分时，单凭条料上一薄层的润滑剂紧附在表层，随材料转移和润滑膜的延伸，不足以覆盖整个剪切面。

③ 工件剪切面靠近毛刺侧的部位是精冲过程润滑最薄弱的区间，条料越厚，毛刺侧部位润滑的条件越差。润滑不充分时，有可能在该处出现干摩擦。

2）保证润滑充分的条件。精冲过程中为了使模具工作面和工件剪切面之间得到润滑，必须保证：

① 模具工作部位应设计有相应的储存润滑剂的结构。

② 润滑剂散量充分。

③ 采用耐压、耐温和附着力强的润滑剂。

前两项是对润滑剂量的要求，保证在模具工作面和工件剪切面之间建立边界润滑条件。第三项是对润滑剂质的要求，即在边界润滑条件下能形成一层附压、耐温的坚韧薄膜，将模面工作表面和工件剪切面隔开。

图 3.2-117 所示是精冲模具储存润滑剂的结构，它们紧靠着模具的刃口，保证精冲时有更多的润滑剂进入工件剪切面和模具工作表面之间。可以看出，靠近凸凹模刃口的压边圈内侧，靠近凹模刃口的反压板外侧，靠近冲孔凸模的反压板内侧都有倒角，顶杆和冲孔凹模间保持较大的间隙，这些都是为了储存润滑剂面设计的结构。另外，压边圈和凹模工作部分的外侧都采用下沉的台阶面，目的是避免精冲时将条料上的润滑剂挤走，而影响下一次精冲时润滑剂的数量。

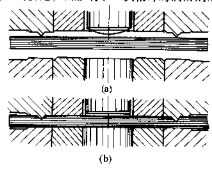


图 3.2-117　利于储存润滑剂的精冲模具结构

3）精冲工艺润滑剂。精冲工艺润滑剂主要由基础油和各种添加剂组成。

基础油是溶剂并起液体润滑作用。添加剂一般由极压剂、油性剂和抗磨剂等组成，在精冲过程中达到边界润滑的效果。

表 3.2-61 给出了适用于不同材料，不同厚度工件精冲的润滑剂。

表 3.2-61　精冲润滑剂[①]性能指标

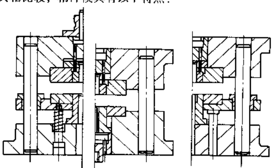
性能 品种	运动黏度(40℃)/mm·s⁻¹	密度(20℃)/g·cm⁻³	闪点(开口)/℃	油膜强度/N	摩擦系数 μ(圆环法)
F-Ⅰ中厚钢板油	90.0～120.0	实测	≥140	1 764	0.042
F-Ⅱ厚钢板油	118.0～138.0	实测	≥150	1 764	0.050
F-Ⅲ薄钢板油	30.0～60.0	实测	≥140	1 127	0.057
F-Ⅳ不锈钢板油	140.0～170.0	实测	≥150	2 156	0.042
F-Ⅴ有色金属板油	60.0～85.0	实测	≥150	1 960	0.054
F-Ⅵ特厚钢板油	150.0～180.0	实测	≥150	1 960	0.048

① 北京机电研究所开发。

10.7　精冲模具

（1）精冲模结构

1）特点。精冲模是一种特殊结构的冲模，与普通形式的复合模结构类似，如图 3.2-118 所示，和普通形式的复合模具相比较，精冲模具有以下特点：



(a) 普通复合冲模　(b) 活动凸模式精冲模　(c) 固定凸模式精冲模

图 3.2-118　精冲模和普通复合冲模比较

① 有 V 形环压边圈，材料在压边圈和凹模、反压板和凸模的夹持下实现冲裁。工艺要求压边力和反压力大于卸料力和顶件力，以满足在变形区建立三向不均匀压应力状态的要求，因此精冲模受力比普通冲模大，刚性要求更高。

② 凸模和凹模之间的间隙小，大约是料厚的 1%，面普通冲模的间隙约为料厚的 5%～10%。

③ 导向精度高，均采用滚动导向，满足凸、凹模小间隙要求；需要时还另加闭锁销来提高抗偏载的能力。

④ 冲裁完毕模具开启时，反压板将工件从凹模内顶出，压边圈将废料从凸模上卸下，不另外需要顶件和卸料装置。

⑤ 由于上出料，凸凹模孔的深度不需要通过凸凹模整个的高度，可使凸凹模和模座更坚固。

2）分类。根据精冲模的功能和结构可分为：

① 单工序模　只冲外形不冲内孔，如精冲卡尺尺身、尺框的模具；或者是只冲内孔不冲外形的模具。

② 复合模　同时精冲外形和内形，大多数精冲模都是复合模。

③ 连续模　分若干个工序，用于精冲复合工艺，如压扁精冲、精冲压沉孔、精冲弯曲等。或者是采用复合模结构



时，凸凹模的强度太弱，用连续模分别冲出工件的内、外形轮廓。

根据匹配的压力机可分为：

用于精冲压力机或用于普通压力机的精冲模，后者需要附加压边和反压系统。

根据凸模和模座的相对关系可分为：

① 活动凸模式　凸模相对模座是活动的，如图 3.2-118b 所示。

② 固定凸模式　凸模固定在模座上，如图 3.2-118c 所示。

3）结构分析

① 活动凸模式精冲模。这种模具的特点是：凸模靠模座和压边圈的内孔导向，凹模和压边圈分别固定在上、下模座上，凸模通过压边圈和凹模保持相对的位置。因此要求凸模和压边圈之间的间隙比凸模和凹模之间的间隙更小。只有使凸模有较长的导向和正确定位才能保证对中。如果凸模轮廓的最大尺寸超过小凸模的高度，准确对中就不易保证，因此活动凸模式模具主要适于中、小尺寸零件的精冲。

图 3.2-119 和图 3.2-120 均为活动凸模式精冲模的典型结构。后者采用座圈结构，有利于凹模和压边圈的加工和装配，适用于更小的零件。另外还采用凸模固定板将凸凹模固定在凸模座上，因为凸凹模小无法用螺钉和凸模座连接。其他零件和图 3.2-119 左侧相同，不再另行标注件号。

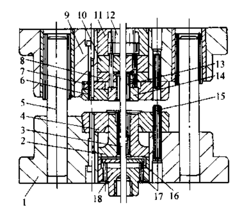


图 3.2-119　活动凸模式模具典型结构Ⅰ

1—下模座；2—凸凹模；3—顶杆；4—压边圈；5—导柱；6—凹模；7—凹模垫板；8—冲孔凸模固定板；9—上模座；10—垫板；11—上垫板；12—压力垫；13—冲孔凸模；14—反压板；15—闭锁销；16—桥板；17—顶杆；18—凸模座

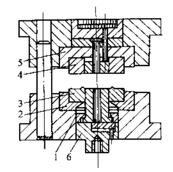


图 3.2-120　活动凸模式模具典型结构Ⅱ

1—凸模固定板；2—座圈；3—压边圈；4—凹模；5—座圈；6—凸模座

② 固定凸模式精冲模。这种模具结构的特点是：凸模固定在模座上，压边圈通过传力杆和模座、凸模保持相对运动，如图 3.2-121 和图 3.2-122 所示。

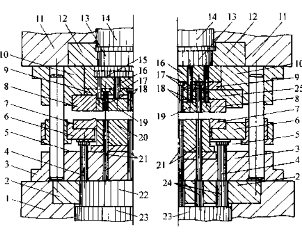


图 3.2-121　固定凸模式精冲模具Ⅰ

1—压力机工作台；2—接合环；3—模座；4—传力杆；5—导套；6—座圈；7—压边圈；8—凹模；9—冲孔凸模固定板；10—模座；11—上工作台；12—接合环；13—压力垫；14—反压力柱塞；15—压力垫；16—上垫板；17—传力杆；18—冲孔凸模；19—反压板；20—凸凹模；21—顶杆；22—压力垫；23—压边力柱塞；24—传力杆；25—座圈

固定凸模式精冲模适于：

a）大型或窄长的零件。

b）不对称的复杂形状零件。

c）内孔较多的零件。

d）冲裁力较大的零件。

e）需要连续模精冲的零件等。

固定凸模式模具精冲时如图 3.2-121 所示，在传力杆 4 及顶杆 21 的作用下，压力垫 22 向下移动，在模座的下面出现很大的空洞，而全部冲裁力都作用在空洞的上方，使凸凹模产生弯曲，这是十分不利的。在大冲裁力的不断作用下，凸凹模的下部会有因弯曲而产生拉裂的危险。为了避免产生这种情况，在冲裁力较大时，需要采用专用结合环，如图 3.2-121b 所示，以改善下模座的支撑条件，避免出现大空洞而使凸凹模产生弯曲。

图 3.2-122 为另一种典型的固定凸模式精冲模结构。20 世纪 80 年代以前，无论是活动凸模式，还是固定凸模式精冲模大部分都采用嵌入式结构，即凹模嵌入模座的圆形凹槽内，压边圈嵌入另一模座（或压边圈座）的圆形凹槽内，如图 3.2-119 左侧、图 3.2-120 和图 3.2-121 所示。嵌入式结构维修拆装重复精度高，模具封闭高度小。但制造困难，不容易保证上、下模工作零件的对中和间隙均匀。早期的闭锁销用在连续模上，防止偏心载荷使模具偏转而折断凸模，后来逐渐应用在单工位精冲模上。闭锁销结构容易保证上、下模对中，而且容易制造。其应用日益广泛。

下面对上述活动凸模式和固定凸模式两种结构作进一步的分析和比较。不同的模具结构形式，要求压力机具有相应的工作台结构相匹配。活动凸模式模具要求压力机的工作台中心部位固定，四周由环形液压缸、环形柱塞构成的浮动液压工作台。固定凸模式模具要求压力机的工作台中心部位有柱塞液压缸。

活动凸模式模具的凸凹模直接固定在上述工作台中心部位，支撑条件好。压边圈和模座固定在四周的浮动工作台上。压边圈的运动比固定式模具的压边圈平稳，后者需要通过许多根传力杆推动，传力杆的高度有误差，就会使凸凹模受侧弯。此外，活动凸模式模具的压边圈和凸凹模之间的间隙极小，而导向部分又长。在凸凹模支撑良好、压边圈运动

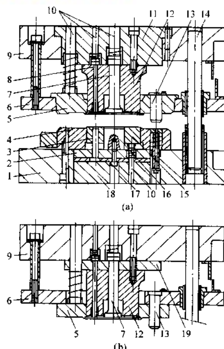


图 3.2-122 固定凸模式精冲模Ⅱ

1—下模座；2—冲孔凸模固定板；3—冲孔凸模；4—凹模；5—压边圈；6—压边圈座；7—顶杆；8—顶杆；9—上模座；10—传力杆；11—上垫板；12—凸凹模；13—闭锁销；14—导柱；15—反压板；16—冲孔凸模；17—隔板；18—下垫板；19—垫板

平稳的条件下，压边圈将防止凸凹模失稳、不受侧向力而起到保护凸凹模的作用。这一点对精冲小零件时所用的细而长的凸凹模尤其显得重要。另外，活动凸模式模具刃磨凸凹模后，只需根据修磨量更换垫圈（系压力机的附件，它有各种厚度可供选择），即可继续进行精冲，十分方便。面面定凸模式模具凸凹模修磨后，需相应地修磨各个传力杆，而且还要重新调整压力机的封闭高度，总之工作量要比活动凸模式模量大。以上都是活动凸模式的优点，但是活动凸模式需要通过桥板将四周浮动工作台的液压力传递给中心部位凸凹模内的顶杆，由于桥板结构空间的限制，活动凸模式不能冲多孔或内形轮廓较大的零件。另外，活动凸模式模具精冲的零件尺寸受凸模座尺寸的限制，例如，窄长的零件，冲裁力虽然在压力机的范围之内，但零件的尺寸却超过了凸模座，超过的部分凸凹模没有支撑，在模具结构上也是不允许的。此外，连续模中几个工步的凸模之间距离很长，安排在活动凸模式模具的凸模座上更是不可能的，这些都是活动凸模式模具的缺点。

由于精冲技术正向大型和复合工艺发展，所以固定凸模式模具的比重将日益增大。

③ 连续精冲模。典型的连续精冲模结构示于图 3.2-123。连续精冲模均采用固定凸模式结构。

连续精冲过程的起始阶段和终了阶段总会出现一部分工位工作的情况，此时会产生偏心载荷。工位愈多，工位间距愈长，偏心载荷引起的倾覆力矩就愈大。一般采用闭锁销结构（见图 3.2-123 中的闭锁销 2）来抗衡偏心载荷引起的倾覆力矩。为此，闭锁销之间的距离沿送料方向应尽可能长些，以增长力臂。

上述部分工位工作时，还会出现全部反压力集中作用在少数凸模和顶杆上，这时一般采用平衡杆结构（见图 3.2-123 中的平衡杆 6）来防止上述零件损坏。平衡杆的另一功能是使反压柱塞运动时保持水平状态，防止因偏载而引起的

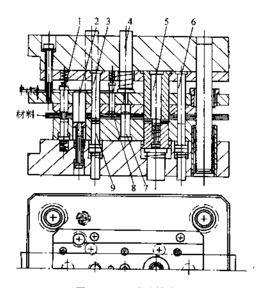


图 3.2-123 连续精冲模

1—导料装置；2—闭锁销；3—冲孔凸模；4—传力杆；5—落料压沉孔凸模；6—平衡杆；7—导正销；8—挡料销；9—顶杆

反压柱塞偏斜。

(2) 排样与搭边

排样的原则和普通冲裁相同。如果工件不要求材料的轧制方向，则排样的目的是在保证工艺过程需要和确保工件剪切面质量的前提下使废料最少。此外，对于外形两侧剪切面质量要求有差异的工件，排样时应将要求高的一侧放在进料方向，以便冲裁时搭边更充分。

图 3.2-124 所示为排样的实例，零件带齿的一侧要求高，另一侧要求低，因此将齿形一侧放在进料方向。

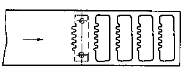


图 3.2-124 排样

精冲由于采用了 V 形环压边，搭边的宽度比普通冲裁大。表 3.2-62 给出了精冲所需搭边的最小值。

表 3.2-62 搭边最小值 mm

料厚	x	y
0.5	1.5	2
1	2	3
1.5	2.5	4
2	3	4.5
2.5	4	5
3	4.5	5.5
3.5	5	6
4	5.5	6.5
5	6	7
6	7	8
8	8	10
10	10	12
12	12	15
15	15	18

(3) V形环尺寸

V形环压边圈是精冲模和普通冲模最显著的区别，它是在压边圈上围绕冲裁轮廓一定距离的凸起的V形埂。V形环的作用是在冲裁前先压住材料，防止剪切区以外的材料在剪切过程中随凸模流动，使材料在冲裁过程中始终保持和冲裁方向垂直而不翘起。另外，V形环压边力还和冲裁力、反压力结合在一起，在材料的剪切变形区形成三向不等压应力状态，以提高材料的塑性。

V形环的尺寸取决于料厚，料厚4 mm以下的V形环尺寸列于表3.2-63。

表3.2-63 单面V形环尺寸 mm

料厚 t	a	h
0.5~1	1	0.3
1~1.5	1.3	0.4
1.5~2	1.6	0.5
2~2.5	2	0.6
2.5~3	2.4	0.7
3~3.5	2.8	0.8
3.5~4	3.2	0.9

料厚在4 mm以上时采用双面V形环，尺寸列于表3.2-64。此时一个V形环在压边圈上，另一个在凹模上。对于齿轮等要求剪切面垂直度较高的零件，即使料厚在4 mm以下，也应采用双V形环。

表3.2-64 双面V形环尺寸 mm

料厚 t	a	h	H
4~5	2.5~3	0.6	0.9
5~6	3	0.8	1.1
6~8	3.5	1.1	1.4
8~10	4.5	1.2	1.6
10~12	5.5	1.6	2
12~15	7	2.2	2.6

冲小孔时，不会发生剪切区以外材料的流动，一般不需要V形环，冲直径30 mm以上的孔时，应在顶杆上加V形环。

如前所述，V形环一般沿冲裁轮廓分布，但是当工件有较小的内凹轮廓时，V形环可以不紧沿轮廓分布，如图3.2-125所示。



图3.2-125 V形环分布
1—刃口；2—V形环

(4) 凸、凹模间隙

精冲凸模和凹模之间的间隙系指凸模刃口和凹模刃口间缝隙的距离，即单边间隙。

除V形环以外，小间隙也是精冲模的主要特征。如前所述，间隙的大小及其沿刃口周边的均匀性，是影响精冲零件剪切面质量的主要因素，因此，选取合理的间隙、保证四周间隙均匀，并在结构上使冲切元件有足够的刚度和导向精度，使其在整个工作过程中，保持间隙的均匀恒定不变是实现精冲的技术关键。

精冲间隙主要取决于材料的厚度，也和冲裁轮廓及工件的材质有关。凸模和凹模的间隙数值列于表3.2-65。

表3.2-65提供的数据，是具有最佳精冲组织的碳钢，在剪切面表面完好率为1级、模具寿命高的基础上制定的。

表3.2-65 凸模和凹模的间隙

料厚 t/mm	外形	内形（孔，直径 d）		
		$d<t$	$d=(1\sim5)t$	$d>5t$
0.5	0.5%t	1.2%t	1.0%t	0.5%t
1		1.2%t	1.0%t	0.5%t
2		1.2%t	0.5%t	0.25%t
3		1.0%t	0.5%t	0.25%t
4		0.8%t	0.37%t	0.25%t
6		0.8%t	0.25%t	0.25%t
10		0.7%t	0.25%t	0.25%t
15		0.5%t	0.25%t	0.25%t

对于外轮廓，凸模和凹模之间的间隙是冲裁料厚的0.5%。对于齿轮，在齿顶和齿根部分间隙应加倍，这一条也适用于有缺口的零件。对带沟槽或其他类似缺口的零件，若外轮廓的相应部分不带V形环，则均按内轮廓处理。

对于内形廓，孔的直径、长度、宽度和料厚一样也是决定间隙的重要因素。应强调指出，在实际工作中，必须结合精冲件的材质和剪切面的要求，灵活运用表3.2-64中的数据。对于不易精冲的材料，间隙应取得更小一些。根据精冲件质量标准，对于允许剪切面有一定缺陷的零件，间隙可选取得稍大一些。间隙大，意味着模具的寿命长，便于加工。总之，设计者应充分考虑技术和经济效果的统一。

对于外轮廓剪切面质量局部要求高，其他部分要求低的零件，同样可按上述原则，不同部位选取不同的间隙。在这种情况下，必须防止凸凹模和压边圈之间也具有不同的间隙，在模具结构上应确保凸模和压边圈四周仍然保持良好的导向。

(5) 凸模和凹模尺寸

在正常情况下，精冲的外形比凹模刃口稍小，其差值小于0.01 mm，精冲件的内孔比冲孔凸模的刃口稍小些。由于这种倾向，凹模和冲孔凸模在理想情况下，应比工件要求尺寸大0.005~0.01 mm。因此，在精冲件的尺寸公差要求较严的情况下，确定凹模和冲孔凸模尺寸时应考虑上述因素。

设计模具刃口尺寸时，应考虑模具磨损对零件尺寸的影响。模具磨损对零件尺寸的影响分为三类，如图3.2-126。

1) 随模具刃口的磨损零件尺寸逐渐增大，如图3.2-126中的尺寸 A。

2) 随模具刃口的磨损零件尺寸逐渐减小，如图3.2-126中的尺寸 B。

3) 模具刃口的磨损对零件尺寸基本无影响，如图3.2-126中的尺寸 C。

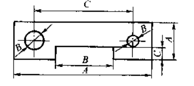


图 3.2-126 模具磨损对零件尺寸的影响
A—零件尺寸逐渐增大；B—零件尺寸逐渐减小；
C—零件尺寸基本不变

为了提高模具寿命，确定模具刃口尺寸时，应考虑在保证精冲件尺寸公差的前提下，使模具刃口具有较多的磨损储备量。为此，对于上述第一类情况，应使新模具的刃口尺寸接近零件的下限尺寸，即取刃口的名义尺寸为

$$A = L_{min} + \frac{\Delta}{4}$$

式中，L_{min}为零件的下限尺寸，mm；Δ 为零件的公差，mm。

对于上述的第二类情况，应使新模具的刃口尺寸接近零件的上限尺寸，即取刃口的名义尺寸为

$$B = L_{max} - \frac{\Delta}{4}$$

式中，L_{max}为零件的上限尺寸，mm。

对于上述第三类情况，应使新模具刃口尺寸等于零件的平均尺寸，即取刃口的名义尺寸为

$$C = (L_{min} + L_{max})/2$$

1）落料。精冲件的外形尺寸取决于凹模，此时间隙应取在凸模上。

随着凹模的磨损零件尺寸逐渐增大，应按上述第一类情况确定，精冲凹模刃口的尺寸 A 为

$$A = \left(L_{min} + \frac{\Delta}{4}\right)^{+\delta}_{0}$$

式中，δ 为模具的制造公差，mm；Δ、L_{min}为同前，分别代表零件的公差和最小尺寸，mm。

如果零件外形上有内凹的部分，则该处零件的尺寸将随凹模的磨损而逐渐减小，属第二类情况，此处精冲凹模刃口的尺寸 B 为

$$B = \left(L_{max} - \frac{\Delta}{4}\right)^{0}_{-\delta}$$

其中，L_{max}，Δ、δ 同前，分别表示零件的最大尺寸、零件公差和模具制造公差。

2）冲孔。精冲件内形尺寸取决于凸模，此时间隙应取在凹模上。

随着凸模的磨损零件尺寸逐渐减小，属于上述第二类情况，因此精冲凸模的尺寸 B 应确定为

$$B = \left(L_{max} - \frac{\Delta}{4}\right)^{0}_{-\delta}$$

如果零件内形上有凸出的部分，则该处零件尺寸将随凸模的磨损而增大，属第一类情况，此处精冲凸模刃口尺寸 A 为

$$A = \left(L_{min} + \frac{\Delta}{4}\right)^{+\delta}_{0}$$

3）计算实例。确定图 3.2-127 所示精冲件凸模和凹模刃口尺寸的计算方法。

图中尺寸 A_1、A_2、A_3、A_4 和 A_5 属上述第一类情况，尺寸按 A 计算；图中 B_1、B_2、B_3 和 B_4 属上述第二类情况，尺寸按 B 计算；图中 C_1、C_2 和 C_3 属上述第三类情况，尺寸按 C 计算。

(6) 模芯结构

精冲模包括模架及模芯两大部分，模架及其零件均已系列化，可根据精冲零件的尺寸和模芯结构直接选用，设计者只需考虑模芯的结构设计。

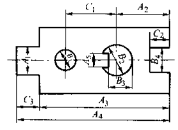


图 3.2-127 按零件内外轮廓确定凸模和凹模尺寸示例

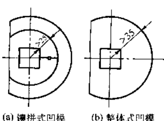
模芯是精冲模的工作部分，主要包括凹模、凸凹模、冲孔凸模、压边圈、反压板和顶杆等。

精冲模具同时承受三种载荷，受力大、间隙小和普通冲裁模比较，除了精度高以外，另一个重要的特点是模芯的刚性要求高。

1）凹模。凹模结构分整体式和镶拼式两种。凹模的厚度和外形尺寸都比普通冲裁大，以增加刚性。

图 3.2-128 所示为冲 1.5 ~ 3 mm 料厚的凹模孔腔至边缘的最小距离，镶拼式凹模不小于 25 mm，整体式凹模不小于 35 mm。材料厚度增加时此值也应该相应增加。

由于慢走丝线切割等先进制模技术的采用，镶拼式凹模结构在实际应用中已逐渐减少。



(a) 镶拼式凹模 (b) 整体式凹模

图 3.2-128 凹模孔腔至边缘最小距离

对于形状复杂而又薄弱的部分，可采用凹模镶块结构，如图 3.2-129 所示。这种结构的镶块装在冲孔凸模固定板上，更换方便，镶块一般都有备件，确保损坏后不停产。

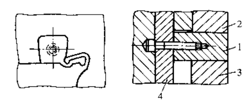
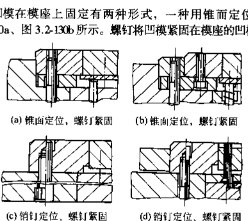


图 3.2-129 薄弱部分的凹模镶块
1—凹模镶块；2—凹模；3—反压板；4—冲孔凸模固定板

凹模在模座上固定有两种形式，一种用锥面定位如图 3.2-130a、图 3.2-130b 所示。螺钉将凹模紧固在模座的凹槽内，



(a) 锥面定位，螺钉紧固 (b) 锥面定位，螺钉紧固

(c) 销钉定位、螺钉紧固 (d) 销钉定位、螺钉紧固

图 3.2-130 凹模的固定方式



用销钉防转。这种结构定位可靠，重复精度高，但加工较复杂，适合于中、小型模具采用。

另一种固定方式和普通冲模相同，如图 3.2-130c、图 3.2-130d 所示，用销钉定位，螺钉固定。另外，这种结构还采用闭锁销使凹模和压边圈精确定位，保证上、下对中容易，结构简单。

凹模用锥面定位时，所用锥角为 3°，预压量为 0.4 mm，示于图 3.2-131。

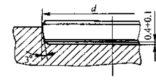


图 3.2-131 凹模装入模座锥面的预压量和锥角

2) 压边圈。V 形环压边圈是精冲模的主要特征，其功能为：

在变形区建立不均匀的三向压应力状态；

防止材料在冲裁过程中随凸模流动；

夹持材料使其和冲裁方向垂直；

对材料起校平作用；

保护凸模，对凸模起导向定位作用；

卸料等。

它是精冲模的重要零件，其外形结构及固定方法与凹模基本类同。为了防止模具闭合时压坏 V 形环，需采用防护措施如图 3.2-132 所示。

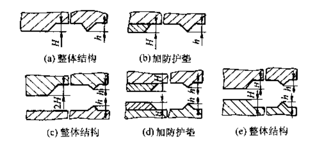


图 3.2-132 压边圈 V 形环防护结构

防护垫的高度 H 需大于 V 形环高度 h，小于料厚 t。采用双面 V 形环时，防护垫的高度 $2H$ 也需大于 V 环形高度 $2h$，小于料厚 t。

防护垫对称安排，置于送料方向的两侧，中间开挡需大于条料宽度。降低送料方向 V 形环压料面的高度，防止条料上的润滑剂被挤走。示于图 3.2-133。

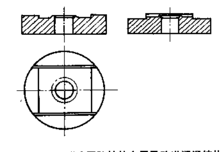


图 3.2-135 压边圈防护垫布置及改进润滑结构

3) 凸模。凸模的结构形式由于加工方法的不同分为两大类，如图 3.2-134 所示。一类是等截面见图 3.2-134a、d，另一类是带凸缘的。如图 3.2-134c、b 所示。线切割和成形磨削加工的凸模为等截面，仿形刨和滚锥加工的凸模带凸缘，外圆磨和电火花可加工上述两类结构的模具。

为了加强凸模，使其尽可能地坚固，当凸模上有复杂形状的内孔或孔壁较薄时，通常只做成一定的深度，此深度取决于孔的形状，料厚和模具尺寸，一般为 8 ~ 15 mm。参阅图 3.2-134d 和图 3.2-143。

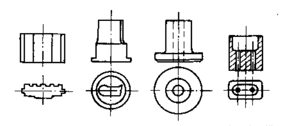


图 3.2-134 凸模结构形式

凸模的固定方法示于图 3.2-135，根据凸模的结构和尺寸大小采取不同的固定方法。

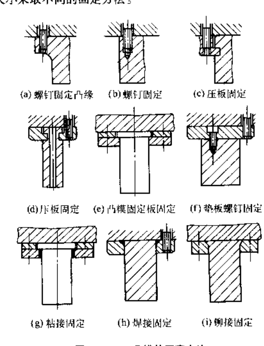


图 3.2-135 凸模的固定方法

当精冲厚板而凸模底面积又较小时，可在凸模底面和模座之间装一淬硬的垫板以防止在模座上压出印来，见图 3.2-135f。

由于目前精冲模具加工广泛采用慢走丝线切割，因此凸模结构形式更多采用等截面，如图 3.2-134a、d 所示。凸模固定方法更多采用图 3.2-135b、i 所示。

4) 凸模座及桥板。这种结构用于活动凸模式，将凸模和凸模座分开有三个优点：

① 由于采用环形液压缸和柱塞，液压力需通过桥板从四周传到中间。将凸模和凸模座分开，容易在凸模座上铣出安装桥板所需的任何形状。

② 凸模座和凸模的截面尺寸变化很大，将两者分开便于消除凸模淬火变形。

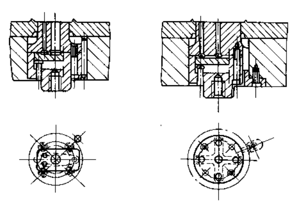
③ 凸模由压边圈导向，凸模座由模座孔导向，将两者分开，便于装配。

凸模座大部分采用圆形，如图 3.2-136 所示。对于长而窄的零件也可采用矩形凸模座，但矩形凸模座对中困难。

凸模和凸模座可采用骑缝钉防转，骑缝钉直径的 $\frac{2}{3}$ 在模座内，$\frac{1}{3}$ 在凸模座内，如图 3.2-136a 所示。也可采用键



防转，如图 3.2-136b 所示。



(a) 矩形桥板，用骑缝钉防转　　(b) 十字形桥板，用键防转

图 3.2-136　凸模座及桥板结构

桥板的形状可根据凸模上顶杆的形状和位置设计，既要保证传递压力的要求，又要使凸模的支撑面积尽可能大。桥板的形状有矩形，见图 3.2-136a，也有十字形，见图 3.2-136b 和三角形。

5）冲孔凸模。和凸模一样冲孔凸模也分为等截面和带凸缘两类。

圆形冲孔凸模的头部凸缘结构如图 3.2-137 所示，固定方法示于图 3.2-138。

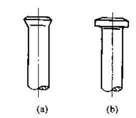


图 3.2-137　圆冲孔凸模头部凸缘结构

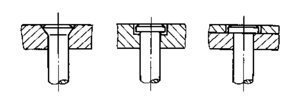


图 3.2-138　圆冲孔凸模固定方法

冲孔直径小于料厚的凸模，为了保证强度，仅在端部磨至所需尺寸，如图 3.2-139 所示。采用图 a、b 的导向方法是有利的。头部凸缘采用图 3.2-137b 所示的直凸缘。

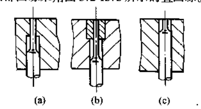


图 3.2-139　冲孔直径小于料厚的台阶式冲孔凸模

异形冲孔凸模的固定方法示于图 3.2-140。同样也可以采用铆接、焊接和粘接方法固定。

轮廓薄弱的冲孔凸模仅借反压板不能防止转动时，可在凸模头部用键防转，如图 3.2-140c 和图 3.2-140d 所示。

6）反压板。反压板的作用：

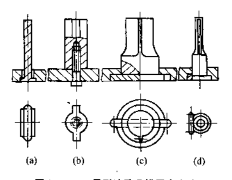


图 3.2-140　异形冲孔凸模固定方法

配合冲裁力和压边力，在变形区建立不均匀的三向压应力状态。

夹持材料使其和冲裁方向垂直。

对工件起校平作用。

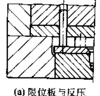
保护冲孔凸模，对冲孔凸模起导向和定位作用。

冲裁结束后，将工件从凹模内顶出。

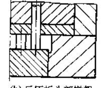
在复合工艺中，在工件上压印、成形和弯曲等。

反压板放置在凹模内，其形状和尺寸与凸模的工作部分相同。外形和凹模、内形和冲孔凸模无松动滑配。

如果凹模和反压板在下模座一侧，则反压板采用等截面直接支撑在顶杆上。如果凹模和反压板在上模座一侧，为了防止反压板从凹模中掉出，则需在反压板上加一限位板，或将反压板的头部镦粗，如图 3.2-141 所示。



(a) 限位板与反压板用螺钉固定



(b) 反压板头部镦粗

图 3.2-141　反压板结构

7）顶杆。顶杆的作用是在冲裁完毕后将废料从凸凹模的冲孔凹模内顶出。

顶杆结构如图 3.2-142 和图 3.2-143 所示。为了防止废料粘在顶杆上，可将顶杆头部稍微导圆，见图 3.2-142a，在头部加弹簧顶料销，见图 3.2-142b，或者在板上刻交叉的小槽以使废料易被吹掉，见图 3.2-142c。

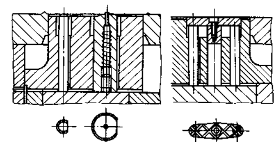


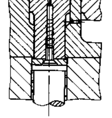
图 3.2-142　顶杆结构 I

如果盖板不能用螺钉拧在如图 3.2-142c 所示的顶杆上，则板可用销固住，使其不能掉到模具的外面，见图 3.2-143a。

如果内孔的尺寸是料厚的 10 倍以上时，建议在顶杆上加 V 形环，借以提高内孔剪切面的质量，如图 3.2-143b 所示。在这种情况下，更需要在端部加弹簧顶料销，以利于清



除废料。



(a) 用销固定住盖板　　(b) V 形环顶板

图 3.2-143 顶杆结构 Ⅱ

弹簧顶料销应高出端面 0.2 ~ 0.3 mm，各种结构示于图 3.2-144。

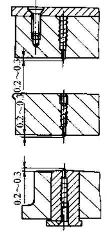
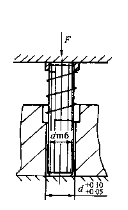


图 3.2-144 弹簧顶料销结构

8) 传力杆。传力杆用于传递压边力，反压力、顶件力和卸料力。结构示于图 3.2-145，用弹簧承受传力杆自重，防止运输和装模时传力杆掉出。



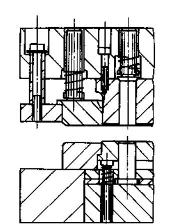


图 3.2-145 传力杆结构

传力杆的许用应力为 500 MPa，各种直径传力杆的许可载荷列于表 3.2-66。

9) 闭锁销。闭锁销的典型结构示于图 3.2-146。

闭锁销的功能，闭锁销可用在不同类型的精冲模具上，其功能也不尽相同。用在多工位连续模上的闭锁销，其主要功能是在起始和末尾工位模具承受较大偏心载荷时防止模具偏转而折断凸模。

表 3.2-66 传力杆的许可载荷

传力杆直径/mm	许可载荷/N	传力杆直径/mm	许可载荷/N
4	6 280	16	100 530
5	9 820	20	157 080
6	14 140	22	190 070
8	25 130	24	226 200
10	39 270	30	353 430
12	56 550	32	402 120
14	769 970		

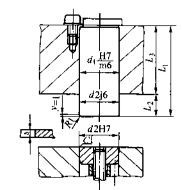


图 3.2-146 闭锁销结构

精冲模具上下模座之间一般都采用滚动导向，钢球直径大于导柱和导套之间的间隙，径向过盈量为 0.01 ~ 0.02 mm。这种结构由于无间隙，导向精度高，可精确保证上下模对中，但由于钢球和导柱、导套之间是点接触，刚性差，不能承受偏心载荷，因此精冲连续模都必须采用闭锁销，使模具具有抗偏载和侧向载荷的能力，参阅图 3.2-123。

闭锁销用于单工位模具时，其主要功能是保证压边圈和凹模精确对中定位，防止精冲过程中可能产生的侧向力使模具工作零件间产生侧移，如图 3.2-122 所示。

需要时闭锁销可采取配合加工，使它和销孔的间隙小于凸模和凹模之间的间隙，用以提高上、下模对中的精度。

10) 平衡杆。平衡杆用在连续模上，其主要功能是在连续冲裁的起始阶段和结束阶段，避免精冲压力机（或液压模架）反压柱塞的全部反压力作用在少数冲孔凸模和顶杆上，引起这些零件损坏，如图 3.2-123 和图 3.2-147 所示。

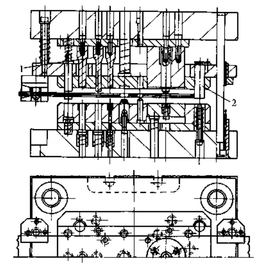


图 3.2-147 连续模的平衡杆结构

1—平衡杆；2—闭锁销



另外，反压柱塞和液压缸之间由于密封环结构的需要，两者之间有一定的间隙。当柱塞承受偏心力时会产生偏斜，导致传递的反压力也产生偏斜，而这是需要避免的。平衡杆的另一个功能就使反压柱塞运动时保持水平状态，从而使各反压力均垂直于模面，有利于模具寿命的提高。

平衡杆平面位置的布置原则是在连续模冲裁的起始阶段和结束阶段尽可能使反压力的合力接近柱塞的中心部位。平衡杆分布在条料的两侧，如图 3.2-147 所示。

平衡杆高度的设计原则是在连续模冲裁的起始阶段和结束阶段，模具闭合时平衡杆和凸模同时承受反压力，为此，在平衡杆和凸模下面的顶出装置等高的条件下，平衡杆必须高出凸模一个料厚才能实现上述技术要求，如图 3.2-147 所示。

但是由于料厚是有公差的，在实际连续模精冲过程中，平衡杆和凸模承受反压力总是不同步的。根据精冲工艺的要求，应保证冲压时凸模先承受反压力，为此必须使平衡杆滞后于凸模承受反压力。满足此条件必须取材料厚度的下极限作为平衡杆和凸模高度之差。即

$$H_1 - H_2 = t_{min}$$

式中，H_1 为平衡杆的高度，mm；H_2 为凸模的高度，mm；t_{min}为被冲材料厚度的下极限尺寸，mm。

根据此原则设计的连续精冲模在实际精冲过程中，如果材料厚度是下极限尺寸，则凸模和平衡杆同时承受反压力。如果实际料厚大于下根限尺寸一个 Δ 值时，则凸模压入材料 Δ 值深度后平衡杆才开始承受反压力。由此可见，采用连续模精冲时对料厚公差必须严格控制，若材料厚度的偏差过大，即使果用了平衡杆结构也有可能造成局部小凸模和顶杆的损坏。

总之，设计平衡杆时，既要保护凸模，平均分散反压力，又要防止平衡杆先于凸模承受反压力，否则，凸模下的顶杆装置将形同虚设，精冲过程中自始至终凸模下将建立不起反压力。另外，如果平衡杆和凸模下而的顶出装置不等高时，计算平衡杆高度时还应考虑其差值。

11）排气、冷却、润滑。模具工作零件之间间隙极小，配合紧密，它们之间构成相对运动的封闭空间，应设计排气槽与大气相通，如图 3.2-148 所示。如果没有排气槽，反压板在精冲过程中多次往返运动后，在上垫板与压力垫之间可能出现升压或降压，从而影响反压板的运动，导致安全装置起作用，使压力机停车。

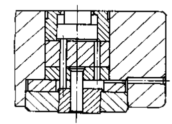
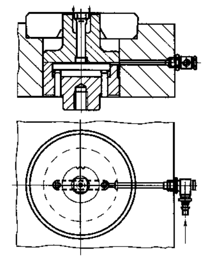


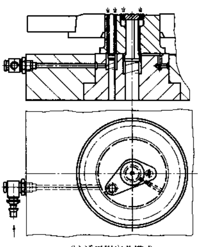
图 3.2-148 排气槽

有些在下模一侧的反压根或顶杆，是头部没有凸缘的等截面结构。冲裁过程中，多次往复后，这些反压根和顶杆可能在压缩空气的作用下升出模具工作表面，影响冲压工作的正常进行，也需要开排气槽。

塑性变形和摩擦会引起温升，除了良好的润滑可以减少摩擦散发热量外，对模具壁厚较薄的部位，在自动连续冲裁条件下会因温升而降低寿命，可采用压缩空气吹，达到冷却凸模提高寿命的目的，见图 3.2-149。压缩空气还有利于清除废料。



(a) 适于活动凸模式



(b) 适于固定凸模式

图 3.2-149 压缩空气冷却凸模装置

为了使润滑充分，在反压板、顶杆和压边圈与模具工作表而接触的端面上倒角，见图 3.2-150，当模具闭合时，涂在材料两面的润滑剂被挤入上述凹槽内，成为储油空间。它紧靠模具的工作表而，在冲裁过程中储存的润滑剂会被模具工作表面带入剪切变形区，从而大大提高了润滑效率。

为了使模具闭合时不挤走下一次冲裁所需的润滑剂，凹模和压边圈在送料方向都做成有下沉的台阶，如图 3.2-150 所示。沉台至模具刃口的距离 D 和料厚，送料距离，工件形状等有关，一般取 D 为料厚的两倍。

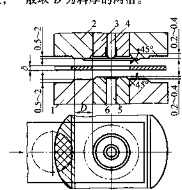


图 3.2-150 改善润滑的模具结构

1—凹模；2—压边圈；3—凸模；4—顶杆；5—冲孔凸模；6—反压板

12）零件间配合和尺寸要求。图3.2-151和图3.2-152所示分别为活动凸模式和固定凸模式的上模和下模各零件间的配合和相关的尺寸要求。

调试时如发现工件剪切面出现撕裂，应检查是否由于压边和反压系统刚性差，未能在冲裁前实现强力压边。此时应适当增加压边圈高出凸模的数值，确保冲裁前完成强力压边。

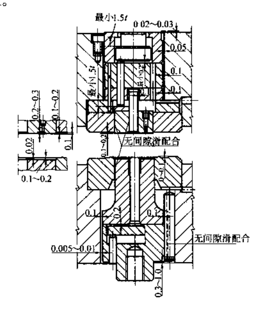


图3.2-151 活动凸模式精冲模零件间的配合和尺寸要求

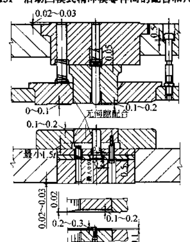


图3.2-152 固定凸模式精冲模零件间的配合尺寸要求

另外，当凸模的强度和刚性足够而且不靠压边圈定位时，可以适当放松凸模和压边圈之间的配合间隙。同样，当冲孔凸模的强度和刚性足够而且不靠反压板定位和导向时，也可以适当放松反压板和冲孔凸模以及凹模之间的间隙，以利于加工。

13）模芯材料及硬度要求。精冲工件的材质、料厚和几何形状，以及精冲模芯零件的受力情况，是选择模芯材料的依据。精冲模芯零件的受力情况如表3.2-67所示。

表3.2-67 精冲模芯零件受力情况

模具零件	摩擦力	压应力	弯曲应力	拉应力	冲击
凸模	√	√	√	√	√
凹模	√	√	√		√
冲孔凸模	√	√	√	√	√
压边圈	√	√	√		√
反压板		√	√		
顶杆		√	√		
传力杆		√			
垫板		√			

精冲模芯零件，特别是凸模和凹模，是在十分恶劣的条件下工作的，在冲击载荷作用下，承受高压和瞬时高温，刃口工作表面在高压和瞬时高温下，和工件的新生表面之间产生相对滑动摩擦，因此选用的模芯材料必须满足以下要求：

① 硬度。精冲模芯的冲切零件间隙小、受力大、磨损严重，要求有较高的硬度，以减小模芯零件的磨损，保证其尺寸精度。但过高的硬度会带来脆性，因此应根据不同零件的受力情况，选择硬度，见表3.2-68。

表3.2-68 精冲模芯零件材料及硬度要求

模具零件	选用材料	硬度 HRC
凸模	W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2、Cr12MoV	60~62
凹模	CM2MoV、W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V	62~64
冲孔凸模	W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V、Cr12MoV	60~62
压边圈	Cr12MoV、CrWMn	58~60
反压板	Cr12MoV、CrWMn	58~60
顶杆、定位销	T10A、T8A、9Mn2V	58~60
传力杆	CrWMn、9Mn2V、T10A	58~60
垫板	Cr12、9Mn2V、9SiCr	56~58
导柱、导套	GCr15	58~62

② 耐磨性。工件新生表面相对模芯工作表面的滑动摩擦所引起的刃口磨损，是精冲模芯主要的失效形式之一。一般情况下，材料的硬度愈高，耐磨性愈好。材料的耐磨性除了和材料的硬度有关外，还和材料的组织有关，如碳化物的类型大小、分布以及状态等。另外，模具材料的含碳量及合金元素均较多，淬火后会有较多的残余奥氏体量，而残余奥氏体的硬度不高，耐磨性差，一般精冲模芯中残余奥氏体量要求控制在5%左右为宜。为了提高耐磨性。可用锻造的方法改变碳化物的大小、形态和分布，同时用热处理的方法控制残余奥氏体的数量，以提高模具的寿命。

③ 强度。精冲时总冲裁力比普通冲裁力大，要求模具有很高的承压、抗弯和抗拉能力，以防止由于偏心载荷、疲劳、应力集中引起的模具破裂和折断。因此要求模芯零件具有较高的强度。

④ 韧性。模芯零件断裂和崩刃是精冲模芯常见的失效形式，产生这种失效的原因很多，其中韧性差是主要原因。影响韧性的因素主要是钢中的碳和合金元素含量、晶粒的大小、碳化物颗粒的大小、分布以及组织状态等。需通过合理的选用模具材料和锻造热处理方法来提高韧性。显然，上述硬度和韧性的要求是存在矛盾的。因此在选材和热处理时，必须注意材料硬度和韧性的统一，从被冲工件的强度和几何形状出发，在不降低韧性的前提下，提高模芯材料的硬度，或者是通过适当降低硬度来提高模芯材料的韧性。

（7）典型结构

1）活动凸模式模具典型结构。图3.2-153、图3.2-154和图3.2-155分别示出了活动凸模式精冲模的三种典型结构。

图3.2-154所示结构的特点是上、下模座不带定位锥形凹槽，凹模和压边圈直接装在上、下模座的平面上，压边圈和凹模靠导销对中，定位和导向重合，有利于加工和对中。

图3.2-155所示结构的特点是用传力板代替桥板，将四周的液压力传递到中间。



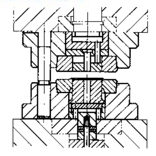


图 3.2-153　活动凸模式精冲模典型结构一

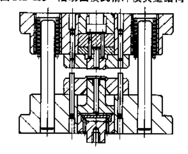


图 3.2-154　活动凸模式精冲模典型结构二

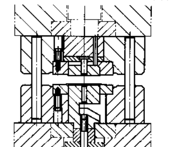


图 3.2-155　活动凸模式精冲模典型结构三

2）固定凸模式模具典型结构。根据压边圈的导向结构和凹、凸模的固定方法，主要有以下四种典型结构，分别示于图 3.2-156～图 3.2-159。

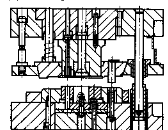


图 3.2-156　固定凸模式精冲模典型结构（一）

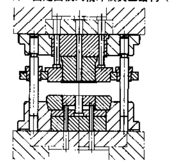


图 3.2-157　固定凸模式精冲模典型结构（二）

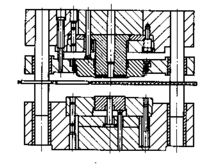


图 3.2-158　固定凸模式精冲模典型结构（三）

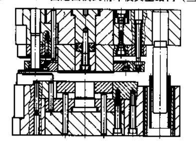
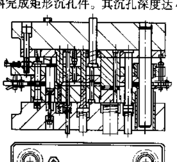
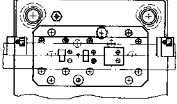


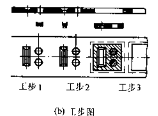
图 3.2-159　固定凸模式精冲模典型结构（四）

3）连续模典型结构。有些复合工艺，如压扁精冲，压沉孔精冲及弯曲精冲等需要在连续模上进行。图 3.2-160 为压沉孔精冲连续模，分为三个工步，即预冲孔和压沉孔、冲孔最后落料完成矩形沉孔件。其沉孔深度达 44%t。

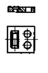




(a) 模具图



(b) 工步图



(c) 零件图

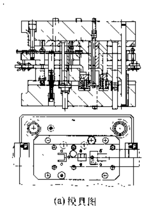
图 3.2-160　压沉孔精冲连续模

图 3.2-161 所示为弯曲精冲连续模，分为三个工步，第一步冲出工艺定位孔和切口，第二工步弯曲，第三工步冲孔落料。通过三个工步可获得弯曲角为 90°的精冲件。

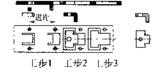
10.8　精冲设备

完成精冲必须具备四个条件，即精冲设备、精冲模具、精冲材料和精冲工艺润滑剂。





(a) 模具图



(b) 工步图　　(c) 零件图

图 3.2-161 弯曲精冲连续模

(1) 精冲压力机

精冲压力机属于专用压力机，专为完成精冲工艺和精冲复合工艺而设计制造的。它必须满足精冲工艺以下基本要求。

1) 能同时提供冲裁力、压边力和反压力。

2) 冲裁速度可调。

3) 滑块行程速度满足快速闭合、慢速冲裁、快速回程的要求。

4) 滑块有很高的导向精度和刚度。

5) 封闭高度重复精度高，有精确的封闭高度指示。

6) 床身刚性好。

7) 有可靠的模具保护装置。

精冲压力机按主传动的结构可分为机械式（见图 3.2-162）和液压式（见图 3.2-163）。按主传动和滑块的相对位置可分为上传动和下传动。按滑块的运动方向可分为立式和卧式。目前最常用的是液压式底传动结构。

两种进口精冲压力机的规格示于表3.2-69和表3.2-70。HFA型为液压式精冲压力机，由德国 Feintool SMG 公司生产。GKP 型精冲压力机为机械式，由瑞士 Feintool Osterwalder 公司生产。

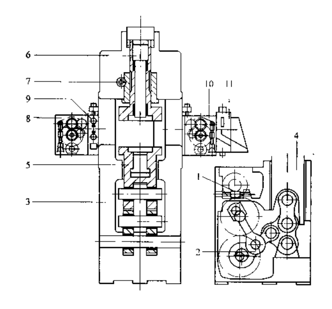


图 3.2-162 机械式精冲压力机示意图

1—变速箱；2—双肘杆；3—四柱框架；4—滑块；5—反压柱塞；6—压边柱塞；7—封闭高度调整装置；8—送料机构；9—喷油器；10—出料机构及抛料装置；11—废料剪

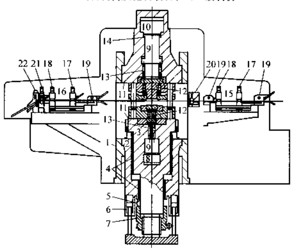


图 3.2-163 液压式精冲压力机示意图

1—床身；2—主液压缸；3—滑块；4—滑块导轨；5—限位；6—快速闭合及快速回程缸；7—封闭高度调节装置；8—反压柱塞；9—传感柱塞（模具保护装置）；10—压边力柱塞；11—工作台；12—压力垫；13—传力杆；14—重量补偿；15—进料机构；16—出料机构；17—固定夹钳；18—活动夹钳；19—材料导向；20—润滑装置；21—抛料器；22—废料剪

表 3.2-69 HFA 型精冲压力机主要技术参数

名称	单位	量值							
		HFA250	HFA320	HFA400	HFA630	HFA800	HFA1000	HFA1400	HFA2500
总压力	kN	2 500	3 200	4 000	6 300	8 000	10 000	14 000	25 000
压边力	kN	100 ~ 1 250	100 ~ 1 600	100 ~ 2 000	100 ~ 3 200	100 ~ 4 000	100 ~ 5 000	300 ~ 5 000	300 ~ 12 500
反压力	kN	100 ~ 1 250	50 ~ 800	50 ~ 1 000	50 ~ 1 300	100 ~ 2 000	100 ~ 2 500	200 ~ 3 000	200 ~ 5 000
最高行程数	1/min	60	60	50	45	40	40	35	15
冲裁速度	mm/s	3 ~ 40	5 ~ 50	5 ~ 50	5 ~ 50	5 ~ 50	5 ~ 50	4 ~ 50	4 ~ 22
封闭高度	mm	300 ~ 380	300 ~ 380	300 ~ 380	320 ~ 400	350 ~ 450	350 ~ 450	520 ~ 600	700 ~ 800
工作行程	mm	30 ~ 70	30 ~ 80	30 ~ 80	30 ~ 100	30 ~ 100	30 ~ 100	30 ~ 100	30 ~ 160



续表 3.2-69

名称	单位	量值							
		HFA250	HFA320	HFA400	HFA630	HFA800	HFA1000	HFA1400	HFA2500
压边行程	mm	25	30	40	40	40	40	30	60
反压行程	mm	25	30	40	40	40	40	30	60
上工作台（左右×前后）	mm	600×600	630×630	800×800	900×900	1 000×1 000	1 100×1 100	1 200×1 200	1 500×1 500
下工作台（左右×前后）	mm	600×600	630×960	600×1 050	900×1 260	1 000×1 200	1 100×1 300	1 200×1 200	1 500×1 500
材料最大厚度	mm	15	16	16	16	16	16	20	40
材料最大宽度	mm	250	250	350	450	450	450	630	800
条料最小长度	mm	2 500	2 700	2 700	3 000	3 300	3 600	—	—
送料最大长度	mm	1～999.9	1～999.9	1～999.9	1～999.9	1～999.9	1～999.9	1～999.9	1～999.9
电动机功率	kW	50	60	80	95	140	200	200	320
重量	t	12	14	19	27	38.5	48	69.5	90

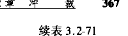
表 3.2-70　GKP 型精冲压力机主要技术参数

名称	单位	量值				
		GKP-FS25	GKP-F40	GKP-F100	GKP-F160	GKP-F250
总压力	kN	250	400	1 000	1 600	2 500
压边力	kN	20～120	20～120	40～310	125～500	20～750
反压力	kN	0.2～120	5～120	10～270	10～400	20～750
行程次数	1/min	63～160	36～90	20～80	18～72	15～60
冲裁速度	mm/s	5～15	5～15	5～15	5～15	5～15
工作行程	mm	25	45	50	61	61
压边行程	mm	8	8	8	10	15
反压行程	mm	7	7	14	14	13
封闭高度	mm					
活动工作台		100～170	110～180	140～220	194～274	
固定工作台				175～225	234～314	
复合工作台（活动凸模）				140～220	184～264	
复合工作台（固定凸模）				150～230	197～274	
模具安装面积	mm					
上工作台		280×280	280×280	420×430	480×520	540×540
活动式下工作台		280×300	280×300	420×430	480×520	
固定式下工作台				420×430	480×520	
复合式下工作台				420×430	480×520	540×540
材料最大厚度	mm	2	4	5	6	10
材料最大宽度	mm	64	100	180	210	250
送料最大长度	mm	66	60	180	180	250
电动机功率	kW	4.5	4	8	13	29
重量	t	3.3	3.3	7	10.2	16

国产精冲压力机的规格示于表 3.7-71。

表 3.2-71　y26A 型精冲压力机主要技术参数

名　称	单位	量值					
		Y26A-100	Y26A-160	Y26A-250	Y26A-400	Y26A-630	Y26A-800
总压力	kN	1 000	1 600	2 500	4 000	6 300	8 000
压边力	kN	100～500	100～800	100～1 250	100～2 000	100～3 200	100～4 000
反压力	kN	50～250	50～400	50～600	100～1 000	100～1 600	100～2 000
废料剪断力	kN	250	250	400	400	630	630
最高行程次数	1/min	60	60	50	50	45	40
冲裁速度	mm/s	5～50	5～50	5～50	5～50	5～50	5～50
工作行程	mm	30～90	30～90	30～100	30～100	30～120	30～120
压边行程	mm	25	30	30	40	40	40
反压行程	mm	25	30	30	40	40	40



续表 3.2-71

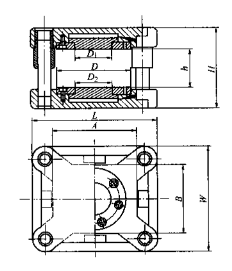
名称	单位	量值					
		Y26A-100	Y26A-160	Y26A-250	Y26A-400	Y26A-630	Y26A-800
装模高度	mm	280～350	280～350	300～380	300～380	300～380	320～400
上工作台（左右×前后）	mm	420×420	500×500	500×500	750×750	900×900	1 000×1 000
下工作台（左右×前后）	mm	400×500	500×600	500×700	750×800	900×1 000	1 000×1 100
立柱间前后距离	mm	290	290	320	400	500	620
立柱间左右距离	mm	460	540	640	800	930	1 100
最大送料步距	mm	130×2	130×2	160×2	200×2	200×2	280×2
最大料宽	mm	180	210	250	320	380	450
最大料厚	mm	12	12	14	16	16	16
主电动机功率	kW	18.5	30	45	55	75	110
总功率	kW	25	46	64	78	101	136
重量	t	10	14	18	22	30	40

（2）经济型精冲技术

目前影响我国普遍采用精冲技术的主要障碍是进口精冲压力机的价格太贵，针对这种情况，出现了经济型精冲技术。

1）精冲液压模架。图 3.2-164 所示为液压模架及其液压系统，可提供压边力和反压力以及精确的导向，将它装在普通的压力机上，该压力机就具有精冲压力机的功能，可完成精冲生产，投资少，见效快。

常用三种液压模架的规格列于表 3.2-72。



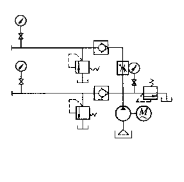


图 3.2-164 液压模架及其液压系统

表 3.2-72 常用液压模架规格

型号	配用压机 /kN	长度 l /mm	宽度 W /mm	闭合高度 H/mm		最大压边力/kN	最大反压力/kN	闭合高度 h/mm		A /mm	B /mm	D /mm	D₁ /mm	D₂ /mm
				max	min			max	min					
大型	6 300～8 000	900	900	700	600	2 500	1 000	400	320	660	660	620	320 260 200	260 200 140
中型	3 150～4 000	620	620	600	520	1 500	600	320	260	420	420	380	220 180 140	180 140 100
小型	1 000～1 600	470	470	320	290	600	300	150	120	270	270	240	150 110 70	110 80 50



利用液压模架开展精冲仍然是目前我国生产精冲件的主要方法。此项技术 20 世纪 70 年代初由北京机电研究所首创，90 年代中被香港理工大学精冲中心采纳并在香港地区推广。

2）经济型精冲压力机。滑块导轨结构是精冲压力机的核心技术。Y26A 型精冲压力机由北京机电研究所开发，内江锻压机床厂制造，该机滑块采用台阶式内阻尼静压导轨导向，示于图 3.2-165。这种压机经长期使用性能稳定，其中重

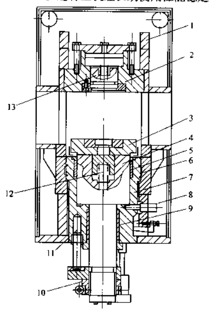


图 3.2-165　采用内阻尼静压导　轨的精冲压力机
1—床身；2—上工作台；3—下工作台；4—主柱塞；
5—台阶式上导轨；6—环形油腔；7—主缸；8—进油管；
9—台阶式下导轨；10—封闭高度调节装置；11—回程缸；
12—反压柱塞；13—压边柱塞

庆五九研究所使用的一台，从 1986 年开始不间断的使用至今压机仍保持良好的状态。在此基础上北京机电研究所进行了二次开发，推出了经济型精冲压力机，由徐州特种锻压机床厂制造。规格列于表 3.2-73。

表 3.2-73　Y26E 型精冲压力机主要技术参数

名　称	单位	量值		
		Y26E-315	Y26E-500	Y26E-630
总压力	kN	3 150	5 000	6 300
压边力	kN	100 ~ 1 600	100 ~ 2 500	100 ~ 3 200
反压力	kN	100 ~ 800	100 ~ 1 250	100 ~ 1 600
卸料力	kN	300	400	500
顶件力	kN	300	400	500
工作行程	mm	30 ~ 100	30 ~ 120	30 ~ 120
压边行程	mm	30	40	40
反压行程	mm	30	40	40
冲裁速度	mm/s	5 ~ 50	5 ~ 50	5 ~ 50
回程及空程速度	mm/s	120	120	100
最大开启高度	mm	800	800	800
换模板高度	mm	2 × 100	2 × 100	2 × 100
装模高度	mm	260 ~ 360	280 ~ 380	300 ~ 400
工作台尺寸（左右 × 前后）	mm	1 120 × 1 120	1 400 × 1 400	1 600 × 1 600
功率	kW	47	56	62
重量	t	28	35	38

经济型精冲压力机造价低廉，和同规格进口压机相比，价格只是它的 1/20，具有很强的价格优势。

编写：涂光祺（北京机电研究所）

第3章 弯　　曲

弯曲是将板料、棒料、管料或型材等弯成一定形状和角度零件的成形方法。在冲压生产中，弯曲是一种应用十分广泛的工艺。弯曲可以在压力机上使用弯曲模压弯，也可以在弯板机、弯管机、滚弯机和拉弯机上进行。各种弯曲方法虽然使用的设备及工具不同，但其变形过程及特点都有共同的规律。

图 3.3-1 所示是常见的弯曲件。

图 3.3-2 所示是各种弯曲方法示意图。

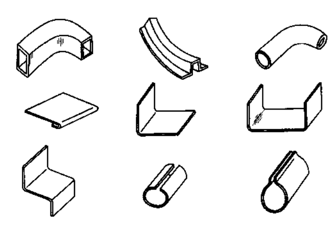


图 3.3-1　常见的弯曲件

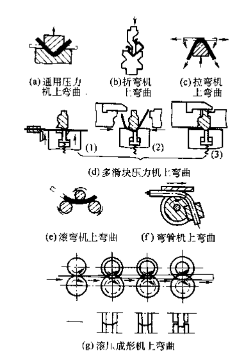


图 3.3-2　各种弯曲方法示意图

1　弯曲变形分析

1.1　弯曲变形过程和特点

图 3.3-3 是 V 形件弯曲的过程。在弯曲的开始阶段，毛坯自由弯曲。凸模下压，毛坯的直边与凹模工作表面靠拢，同时曲率半径和弯曲力臂逐渐变小。直到板料与凸模三点接触，凸模两侧与板料直边接触的点压板料直边向相反的方向变形。到行程终了时，凸、凹模对毛坯贴合，使毛坯的圆角、直边与凸模完全吻合，得到成形零件。在弯曲变形过程中，弯曲半径 r_0、r_1、…、r 及支点距离 l_0、l_1、…、l_k 随着成形过程变化而逐渐减小。

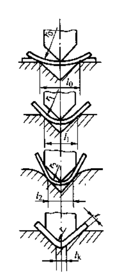
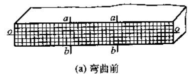


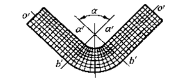
图 3.3-3　弯曲变形过程

为了进一步观察板料弯曲时的金属流动情况，可在弯曲板料的侧面画出正方形网格，然后将其进行弯曲，并用工具显微镜观察网格的变化（见图 3.3-4），可看出弯曲时的变形特点：

1）弯曲件的变形区主要在圆角部分。圆角部分的正方形网格变成了扇形，靠近圆角部分的直边有少量变形，远离圆角的直边部分，网格仍保持原来的正方形，即没有参与变形。



(a) 弯曲前



(b) 弯曲后

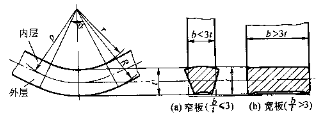
图 3.3-4 弯曲前后网格的变化

2）在变形区内，板料的外缘（靠凹模一侧），正方形网目面积增大，纵向纤维$\overline{bb}$受拉而伸长（$\overline{bb} < \overline{b'b'}$）；板料的内缘（靠凹模一侧），正方形网目面积减小，纵向纤维$\overline{aa}$受压而缩短（$\overline{aa} > \overline{a'a'}$）；变形区在由外缘的拉应变过渡到内缘的压应变时，中间一定存在一层材料纤维的长度在变形前后保持不变，此层称为应变中性层（$\overline{oo} = \overline{o'o'}$）。

3）变形区由外缘的拉应力过渡到内缘的压应力，中间必定有一层材料其切向应力为零，称为应力中性层。

4）当相对弯曲半径 r/t 较小时，在弯曲变形区内，板料的厚度有变薄现象，变薄后的厚度 $t' = \eta t$，η 为变薄系数，且 $\eta < 1$。

5）板料相对宽度（板料宽度与板料厚度比）对弯曲变形有很大影响。相对宽度较小（$\frac{b}{t} \leqslant 3$）的板料弯曲时，外层受拉，引起板料宽度和厚度的收缩；内层受压，使板料宽度和厚度增加，弯曲变形的结果，矩形断面变成扇形（见图 3.3-5）。相对宽度较大（$\frac{b}{t} > 3$）的板料弯曲，宽度方向的伸长和压缩受到限制，材料不易流动，因此，板截面形状变化不大，仍为矩形，仅在端部可能出现翘曲和不平（见图 3.3-5）。



(a) 窄板($\frac{b}{t}<3$)　(b) 宽板($\frac{b}{t}>3$)

图 3.3-5 弯曲时毛坯断面形状的变化

1.2 弯曲变形时应力应变状态

1）窄板弯曲。板料弯曲变形，主要表现在内外层纤维的伸长和压缩，所以切向应变为最大主应变，其外层伸长应变 ε_θ 为正，内层应变 ε_θ 为负。

根据塑性变形体积不变条件 $\varepsilon_\theta + \varepsilon_r + \varepsilon_b = 0$ 可知，板料径向应变 ε_r 和宽度方向应变 ε_b 的符号与最大的切向应变 ε_θ 符号相反，所以

在宽度方向：外层应变 ε_b 为负，内层应变 ε_b 为正。

在径向：外层应变 ε_r 为负，内层应变 ε_r 为正。

板料弯曲的应力状态：

在切向：外层纤维受拉，切向应力 σ_θ 为正，内层纤维受压，切向应力 σ_θ 为负；

在宽度方向：材料可以自由变形，所以内、外层应力接近于零（$\sigma_b \approx 0$）；

在径向：由于弯曲时板料纤维之间相互压缩，内、外层应力 σ_r 均为负值。

由此可见，窄板弯曲时内、外层的应变状态是立体的，应力状态是平面的。

2）宽板弯曲。宽板弯曲时，切向和径向的应变状态与窄板相同。在宽度方向，由于材料流动受阻，几乎不产生变形，故内、外区在宽度方向的应变均为零（$\varepsilon_b \approx 0$）。但按应变状态分析，宽度方向的外缘材料应产生压应变，因受阻而产生拉应力 σ_b；内缘材料应产生拉应变，因受阻而产生压应力 σ_b。

因此，宽板弯曲时是平面应变状态，立体应力状态。

综上所述，可以将弯曲变形的应力应变状态归纳成图 3.3-6 所示。

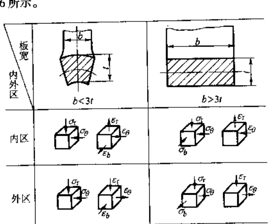


图 3.3-6 自由弯曲时的应力应变状态

2 弯曲件的工艺性

2.1 最小相对弯曲半径

1）最小相对弯曲半径（r_{min}/t）。弯曲过程中板料变形区外缘表面的材料在切向拉应力作用下产生拉伸变形，切向应变值 ε_θ 用式（3.3-1）表示

$$\varepsilon_\theta = \frac{t}{2\rho_0} = \frac{1}{2\frac{r}{t} + 1} \tag{3.3-1}$$

式中，ρ_0 为中心层曲率半径，$\rho_0 = r + \frac{t}{2}$；r 为弯曲半径。

由式（3.3-1）可知，外表面的切向应变 ε_θ 与相对弯曲半径 r/t 的大小有关。相对弯曲半径愈小，表面弯曲变形程度愈大，变形区最外表面的拉伸变形也愈大。当相对弯曲半径减小到一定值后，板料最外表面的变形将超过材料的最大允许变形程度而产生拉裂现象。为了保证弯曲件变形区外表面不发生拉裂破坏，将弯曲件此时的相对弯曲半径称为最小相对弯曲半径，用 r_{min}/t 表示。

2）最小相对弯曲半径的近似计算及实用推荐值。最小相对弯曲半径 r_{min}/t 可近似地用板料的断面收缩率 φ 表示，断面收缩率 φ 可用式（3.3-2）表示

$$\varphi=\frac{\varepsilon_\theta}{1+\varepsilon_\theta} \tag{3.3-2}$$

将式（3.3-1）代入式（3.3-2）可得

$$\frac{r}{t}=\left(\frac{1}{2\varphi}-1\right) \tag{3.3-3}$$

此式表明，当 φ 值达到拉伸试验所得的最大断面收缩率 φ_{max} 时，此时得到的相对弯曲半径为最小相对弯曲半径

$$\frac{r_{min}}{t}=\left(\frac{1}{2\varphi_{max}}-1\right) \tag{3.3-4}$$

常用材料的最小相对弯曲半径实用推荐值可查表 3.3-1。

表 3.3-1 常用材料的最小相对弯曲半径 r/t

材料		弯曲线与轧制纹向垂直	弯曲线与轧制纹向平行
08F、08Al		0.2	0.4
10、15、Q195		0.5	0.8
20、Q215A、Q235A、09MnXtL		0.8	1.2
25、30、35、40、Q255A、10Ti、13MnTi、16MnL、16MnXtL		1.3	1.7
65Mn	T（特硬）	3.0	6.0
	Y（硬）	2.0	4.0
1Cr18Ni9	I（冷作硬化）	0.5	2.0
	BI（半冷作硬化）	0.3	0.5
	R（软）	0.1	0.2
1J79	Y（硬）	0.5	2.0
	M（软）	0.1	0.2
3J1	Y（硬）	3.0	6.0
	M（软）	0.3	0.6
3J53	Y（硬）	0.7	1.2
	M（软）	0.4	0.7
TA1	冷作硬化	3.0	4.0
TA5		5.0	6.0
TB2		7.0	8.0
H62	Y（硬）	0.3	0.8
	Y2（半硬）	0.1	0.2
	M（软）	0.1	0.1

续表 3.3-1

材料		弯曲线与轧制纹向垂直	弯曲线与轧制纹向平行
HPb59-1	Y（硬）	1.5	2.5
	M（软）	0.3	0.4
BZn15-20	Y（硬）	2.0	3.0
	M（软）	0.3	0.5
QSn6.5-0.1	Y（硬）	1.5	2.5
	M（软）	0.2	0.3
QBe2	Y（硬）	0.8	1.5
	M（软）	0.2	0.2
T2	Y（硬）	1.0	1.5
	M（软）	0.1	0.1
1050A、1035	HX8（硬）	0.7	1.5
	O（软）	0.1	0.2
7A04	T9（淬火人工时效又经冷作硬化）	2.0	3.0
	O（软）	1.0	1.5
5A05、5A06、3A21	HX8（硬）	2.5	4.0
	O（软）	0.2	0.3

2.2 材料的纤维方向

板料经过多次轧制后，成为纤维状组织，使板料具有方向性。在板料不同方向上的力学性能有较大的差别，顺纤维方向的塑性指标高于垂直于纤维方向的塑性指标。因此，弯曲件的弯曲线与板料的纤维方向垂直，最小相对弯曲半径 r_{min}/t 最小；若弯曲件的弯曲线与板料的纤维方向平行，则最小相对弯曲半径 r_{min}/t 最大，如图 3.3-7 所示。

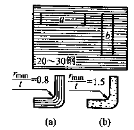


图 3.3-7 纤维方向对 r_{min}/t 的影响

所以对于 r/t 较小的弯曲件，应尽可能使弯曲件折弯线垂直于板的纤维方向，用以提高变形程度，防止外层纤维拉裂。

2.3 影响最小相对弯曲半径的因素

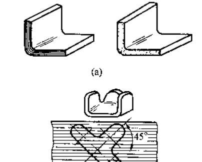
1）材料力学性能。材料力学性能对最小相对弯曲半径有着重要影响。材料的塑性好，外层纤维允许变形程度大，许可最小相对弯曲半径就小。相反，塑性差的材料，许可最小相对弯曲半径大。

相同成分的材料，由于供应状态不同，其力学性能就存在着差异，塑性好的其最小相对弯曲半径就比塑性差的小。如毛坯产生加工硬化后，经退火后的材料允许最小相对弯曲半径就比没退火处理的材料最小相对弯曲半径小。

2）弯曲线的方向。弯曲线方向与板料的纤维方向垂直，

最小相对弯曲半径最小。

若弯曲件有两个互相垂直的弯曲线，而相对弯曲半径又较小时，应避免任何弯曲线与纤维方向平行，最好使两个弯曲线都与纤维方向成45°角（见图3.3-8）。



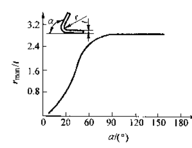


图3.3-8 弯曲线与板料纤维方向

3）弯曲角 α。弯曲角是弯曲件圆角的圆弧所对应的圆心角。理论上弯曲变形区局限于圆角部分，而直边部分不参加变形；因此弯曲变形程度只与 r/t 有关，而与弯曲角 α 无关。但在实际弯曲过程中，由于板料纤维的互相牵连作用，圆角附近的材料也参与变形，从而使变形区的变形得以减轻，最小相对弯曲半径可以减小。图3.3-9所示为弯曲角 α 对最小相对弯曲半径的影响。

r_{min}/t 与 $\alpha/(°)$ 关系曲线：纵轴刻度 0.8、1.6、2.4、3.2；横轴刻度 0、20、60、90、120、150、180。

图3.3-9 弯曲角 α 对 r_{min}/t 的影响

4）板料表面质量和剪切断面质量。板料表面有划伤、裂纹，剪切断面有毛刺、裂纹和加工硬化等缺陷，容易造成应力集中和降低塑性变形稳定性，使材料过早地破坏，此时必须采用较大的相对弯曲半径成形。剪切断面产生变形硬化的毛坯不能以该材料允许的最小相对弯曲半径变形，必须增大相对弯曲半径，或者在弯曲前进行退火软化处理。剪切断面上的大毛刺必须除去，小的毛刺应使带毛刺的表面朝弯曲凸模，以避免应力集中而产生裂纹。

5）弯曲件宽度和厚度。弯曲件的宽度 b 与厚度 t 的比值 b/t 称为相对宽度。相对宽度增大，最小相对弯曲半径也相应增大。在弯曲变形程度相同的条件下，相对宽度增大使弯曲应变强度增大。

弯曲变形区内切向应变在厚度方向上按线性规律变化，在外表面最大，在应变中性层为零。当板料的厚度较小时，切向应变变化的梯度大，这时与切向变形最大的外表面相邻的金属，可以起到阻止外表面金属产生局部不均匀延伸的作用。所以这种情况下可以得到较大的变形程度和较小的最小相对弯曲半径。图3.3-10表明板料厚度对最小相对弯曲半径的影响。

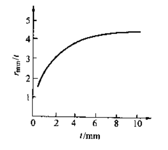


图3.3-10 最小相对弯曲半径与板厚 t 的关系

3 弯曲件展开尺寸计算

3.1 中性层位置

板料弯曲时，外层纤维受拉，内层纤维受压，在拉伸与压缩之间存在着一个既不伸长，也不压缩的纤维层，称该层为应变中性层也称中性层。

在弹性弯曲时，应变中性层的应变和应力均为零，中性层位置一定通过板料横截面中心，可用曲率半径 ρ_0 表示，即 $\rho_0 = r + t/2$。

在塑性弯曲时，板料变形前的长度为 l，宽度为 b，厚度为 t（见图3.3-11），弯曲后成为外径 R，内径 r，厚度为 ξt（ξ 为变薄系数）和弯曲角 α 的形状。根据变形前后金属体积不变的条件，得

$$tlb = \pi (R^2 - r^2) \frac{\alpha}{2\pi} b \tag{3.3-5}$$

塑性弯曲后，中性层长度不变，

$$l = \alpha\rho_0 \tag{3.3-6}$$

将 $R = r + \xi t$ 代入，式（3.3-5）和式（3.3-6）联解得塑性弯曲时的中性层位置

$$\rho_0 = \left(\frac{r}{t} + \frac{\xi}{2}\right) \xi t = \left(r + \frac{1}{2}\xi t\right) \xi \tag{3.3-7}$$

由式（3.3-7）可以看出，塑性弯曲时中性层位置与 r/t、变薄系数 ξ 有关，而弯曲时，随着凸模下行，相对弯曲半径 r/t 和变薄系数 ξ 是不断变化的，所以板料在弯曲时的中性层位置，也在不断改变、逐步移动，在 $r/t \leqslant 4$ 的情况下弯曲，测得变薄系数见表3.3-2，因此由式（3.3-7）可知，当 $\xi < 1$ 时，中性层位置 ρ_0 将小于 $r + \frac{1}{2}\xi t$。$\rho_0 < r + \frac{1}{2}\xi t$ 则表示弯曲时中性层位置向内移动。

表3.3-2 弯曲90°时变薄系数 ξ 的数值

r/t	0.1	0.25	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	>4
ξ	0.82	0.87	0.92	0.96	0.99	0.992	0.995	1.0

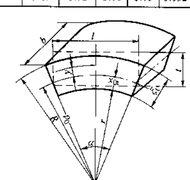


图3.3-11 板料弯曲状态

由表 3.3-2 看出，系数 ξ 值随 r/t 大小变化，r/t 愈小，ξ 值也愈小，中性层的内移量就愈大。因此，凸模下行，变形程度不断增加，中性层位置逐步向内移动，变形量愈大，中性层的内移量也愈大。

由此可见，中层性半径（见图 3.3-12）按式（3.3-8）计算：

$$\rho = r + xt \tag{3.3-8}$$

式中，ρ 为中性层半径，mm；r 为弯曲内半径，mm；x 为中性层位置系数；t 为材料厚度。

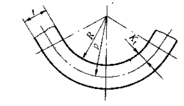


图 3.3-12 中性层半径

中性层系数 x 可由表 3.3-3 或图 3.3-13 求得。中性层半径 ρ 也可从表 3.3-4 直接查得。

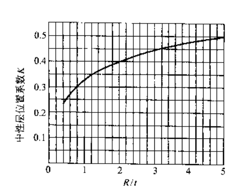


图 3.3-13 中性层位置系数

表 3.3-3 中性层位置系数 x

r/t											
分数 (1)		3/10	5/16	8/25	1/3	12/35	5/14	3/8	2/5	5/12	3/7
小数 (2)		0.3	0.312 5	0.32	0.333	0.343	0.357	0.375	0.4	0.417	0.429
x (3)		0.194	0.199	0.201	0.206	0.209	0.213	0.219	0.226	0.230	0.233
(1)	4/9	12/25	1/2	8/15	5/9	4/7	3/5	5/8	2/3	7/10	5/7
(2)	0.444	0.48	0.5	0.533	0.555	0.571	0.6	0.625	0.667	0.7	0.714
(3)	0,237	0.245	0.250	0.257	0.261	0.264	0.270	0.274	0.281	0.286	0.288
(1)	3/4	4/5	5/6	6/7	8/9	1	10/9	8/7	6/5	5/4	4/3
(2)	0.75	0.8	0.833	0.857	0.889	1	1.111	1.143	1.2	1.25	1.333
(3)	0.294	0.301	0.305	0.308	0.312	0.325	0.336	0.340	0.345	0.349	0.356
(1)	7/5	10/7	3/2	8/5	5/3	12/7	16/9	15/8	2	25/12	15/7
(2)	1.4	1.420	1.5	1.6	1.667	1.714	1.778	1.875	2	2.083	2.143
(3)	0.362	0.364	0.369	0.376	0.380	0.384	0.387	0.393	0.400	0.405	0.408
(1)	20/9	16/7	12/5	5/2	8/3	20/7	3	25/8	16/5	10/3	24/7
(2)	2.222	2.286	2.4	2.5	2.667	2.857	3	3.125	3.2	3.333	3.429
(3)	0.412	0.415	0.420	0.424	0.431	0.439	0.444	0.449	0.451	0.456	0.459
(1)	7/2	25/7	15/4	4	25/6	30/7	35/8	40/9	9/2	24/5	5
(2)	3.5	3.571	3.75	4	4.167	4.286	4.375	4.444	4.5	4.8	5
(3)	0.461	0.463	0.469	0.476	0.480	0.483	0.485	0.487	0.488	0.495	0.500

表 3.3-4 中性层半径 ρ 值 mm

弯曲内半径 R	材料厚度 t															
	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	10
0.2	0.31	—	—	—												
0.3	0.44	0.48	0.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	0.55	0.60	0.63	0.65												
0.5	0.66	0.72	0.75	0.78	0.81	—	—									
0.6	0.77	0.84	0.87	0.90	0.94	0.99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.8	0.99	1.06	1.10	1.14	1.19	1.25	1.30									
1.0	1.20	1.28	1.33	1.37	1.42	1.50	1.57	1.62	—	—	—	—				
1.2	1.41	1.50	1.55	1.59	1.65	1.74	1.81	1.88	1.93	1.98	—	—	—	—	—	—
1.5	1.72	1.81	1.87	1.92	1.99	2.09	2.18	2.25	2.32	2.38	2.43	2.47				

续表 3.3-4

弯曲内半径 R	材料厚度 t															
	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	10
2	2.24	2.34	2.40	2.46	2.53	2.65	2.75	2.84	2.92	3.00	3.07	3.13	3.24	—	—	—
2.5	2.75	2.86	2.92	2.99	3.07	3.20	3.31	3.42	3.51	3.60	3.67	3.75	3.88	3.99	4.09	—
3	3.25	3.38	3.44	3.51	3.60	3.74	3.86	3.98	4.08	4.18	4.26	4.35	4.50	4.63	4.75	4.94
4	4.25	4.40	4.48	4.55	4.65	4.80	4.94	5.07	5.19	5.30	5.40	5.51	5.69	5.85	6.00	6.26
5	5.25	5.40	5.50	5.58	5.68	5.85	6.00	6.14	6.27	6.40	6.51	6.63	6.83	7.02	7.19	7.50
6	6.25	6.40	6.50	6.60	6.71	6.89	7.05	7.20	7.34	7.48	7.60	7.73	7.95	8.16	8.35	8.70
8	8.25	8.40	8.50	8.60	8.75	8.95	9.13	9.29	9.45	9.60	9.74	9.88	10.14	10.38	11.60	11.01
10	10.25	10.40	10.50	10.60	10.75	11.00	11.19	11.37	11.54	11.70	11.85	12.00	12.28	12.55	12.79	13.25
12	12.25	12.40	12.50	12.60	12.75	13.00	13.24	13.43	13.61	13.78	13.94	14.10	14.40	14.69	14.95	15.45
15	15.25	15.40	15.50	15.60	15.75	16.00	16.25	16.50	16.69	16.88	17.05	17.22	17.54	17.86	18.14	18.69
20	20.25	20.40	20.50	20.60	20.75	21.00	21.25	21.50	21.75	22.00	22.19	22.38	22.74	23.07	23.39	24.00
25	25.25	25.40	25.50	25.60	25.75	26.00	26.25	26.50	26.75	27.00	27.25	27.50	27.88	28.24	28.59	29.24
30	30.25	30.40	30.50	30.60	30.75	31.00	31.25	31.50	31.75	32.00	32.25	32.50	32.00	33.38	33.75	34.44
35	35.25	35.40	35.50	35.60	35.75	36.00	36.25	36.50	36.75	37.00	37.25	37.50	38.00	38.50	38.88	39.61
40	40.25	40.40	40.50	40.60	40.75	41.00	41.25	41.50	41.75	42.00	42.25	42.50	43.00	43.50	44.00	44.76
45	45.25	45.40	45.50	45.60	45.75	46.00	46.25	46.50	46.75	47.00	47.25	47.50	48.00	48.50	49.00	49.88
50	50.25	50.40	50.50	50.60	50.75	51.00	51.25	51.50	51.75	52.00	52.25	52.50	53.00	53.50	54.00	55.00
60	60.25	60.40	60.50	60.60	60.75	61.00	61.25	61.50	61.75	62.00	62.25	62.50	63.00	63.50	64.00	65.00

3.2 展开长度计算

根据弯曲件结构形状不同，弯曲圆角半径大小不同以及弯曲方法不同，其毛坯尺寸的计算方法也不同。工程上常采用计算法和查表法来计算弯曲件展开长度。下面分别叙述它们的展开长度计算方法。

(1) 圆角半径 $r \geq 0.5t$ 的弯曲件

如图 3.3-14 所示的弯曲件，其圆角半径 $r > 0.5t$。这类弯曲件的展开长度是根据弯曲前、后中性层长度不变的原则进行计算。弯曲件展开长度等于直线部分的长度和弯曲部分中性层展开长度之和。

$$L = \sum l_{直} + \sum l_{弯} \tag{3.3-9}$$

式中，L 为弯曲件毛坯总长度，mm；$\sum l_{直}$ 为弯曲件各直边长度之和，mm；$\sum l_{弯}$ 为弯曲件各弯曲部分中性层展开长度之和，mm。

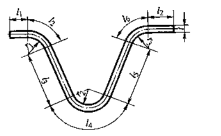


图 3.3-14　圆角半径 $r > 0.5t$ 的弯曲件

弯曲变形部分中性层展开长度按式（3.3-10）计算（见图 3.3-12）：

$$l_{弯} = \frac{\pi \rho \alpha}{180°} = \frac{\pi \alpha}{180°}(r + xt) \tag{3.3-10}$$

式中，$l_{弯}$ 为弯曲部分中性层展开长度，mm；r 为弯曲圆角半径，mm；t 为板料厚度，mm；x 为中性层位置系数（查表 3.3-3）；α 为弯曲角，(°)；ρ 为中性层曲率半径，mm。

当弯曲 90°角时，弯曲部分中性层展开长度为 $1.57(r + xt)$，为了方便计算，表 3.3-5 列出了其压弯 90°时弯曲部分中性层弧长。

90°角的弯曲件其尺寸标注在内侧时，则毛坯长度可按下式（3.3-11）近似计算：

$$L = l_1 + l_2 + K \tag{3.3-11}$$

式中，l_1、l_2 为标注在内侧弯曲件边长尺寸，mm；K 为修正值，(查表 3.3-6)。

表 3.3-7 列出弯曲件的圆角 $r > 0.5t$ 时，毛坯展开长度的计算公式。

(2) 圆角半径 $r < 0.5t$ 的弯曲件

这类弯曲件的毛坯尺寸是根据弯曲前、后材料体积不变的原则进行计算。图 3.3-15 所示无圆角半径弯曲件，其展开计算如下：

表 3.3-5　弯曲 90°时圆角部分中性层弧长

mm

t \ r	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	63	80	100
0.15	0.22	0.39	0.57	0.90	1.37	1.69	2.00	2.47																				
0.20	0.23	0.41	0.58	0.92	1.41	1.73	2.04	2.51	3.30																			
0.25	0.24	0.42	0.60	0.94	1.44	1.76	2.08	2.55	3.34	4.12																		
0.3	0.25	0.44	0.61	0.96	1.46	1.79	2.11	2.59	3.38	4.16	4.95																	
0.4		0.47	0.64	1.00	1.51	1.84	2.17	2.65	3.46	4.24	5.03	6.60																
0.5		0.49	0.67	1.02	1.55	1.88	2.22	2.72	3.52	4.32	5.12	6.68	8.25															
0.6		0.50	0.70	1.05	1.58	1.92	2.26	2.76	3.59	4.38	5.18	6.75	8.33	9.90														
0.8				1.10	1.63	1.99	2.34	2.85	3.68	4.51	5.31	6.91	8.48	10.05	13.19													
0.9				1.13	1.65	2.02	2.37	2.89	3.72	4.56	5.38	6.98	8.56	10.13	13.27													
1.0				1.16	1.69	2.04	2.40	2.92	3.77	4.60	5.43	7.04	8.64	10.21	13.35	16.49												
1.2					1.74	2.09	2.45	2.99	3.85	4.68	5.52	7.16	8.76	10.37	13.51	16.65												
1.5					1.83	2.18	2.53	3.06	3.95	4.82	5.65	7.32	8.97	10.56	13.74	16.89	20.03	24.74										
1.75						2.25	2.59	3.13	4.02	4.90	5.75	7.41	9.09	10.74	13.92	17.08	20.22	24.94										
2.0						2.32	2.67	3.20	4.08	4.98	5.84	7.54	9.20	10.87	14.07	17.28	20.48	25.13	32.99									
2.5							2.83	3.34	4.22	5.10	6.00	7.74	9.42	11.09	14.40	17.59	20.80	25.53	33.38	41.23								
3.0								3.49	4.35	5.24	6.13	7.90	9.64	11.31	14.64	17.92	21.11	25.92	33.77	41.63								
3.5									4.50	5.36	6.26	8.05	9.80	11.50	14.82	18.18	21.49	26.23	34.16	42.02	49.87							
4.0									4.65	5.52	6.40	8.17	9.96	11.69	15.08	18.41	21.74	26.55	34.56	42.41	50.27	58.12	65.97					
4.5										5.66	6.53	8.28	10.12	11.85	15.27	18.64	21.95	26.86	34.87	42.80	50.66	58.51	66.37	74.22				
5.0										5.81	6.68	8.44	10.21	12.01	15.47	18.85	22.18	27.17	35.19	43.20	51.50	58.97	66.76	74.61	82.47			
5.5											6.82	8.57	10.32	12.15	15.63	19.03	22.43	27.40	35.58	43.51	51.44	59.30	67.15	75.01	82.86			
6											6.97	8.71	10.48	12.25	15.80	19.29	22.62	27.61	35.85	43.83	51.84	59.69	67.54	75.40	83.25			
7												9.00	10.73	12.50	16.11	19.60	23.00	28.07	36.36	44.55	52.40	60.48	68.33	76.18	84.04	104.46		
8												9.30	11.02	12.79	16.34	19.92	23.37	28.48	36.82	45.4	53.15	61.14	69.12	76.97	84.82	105.24	131.95	
9													11.32	13.06	16.55	20.18	23.70	28.86	37.24	45.63	53.63	61.76	69.74	77.75	85.61	106.03	132.73	
10													11.62	13.35	16.88	20.42	24.03	29.23	37.70	46.02	54.35	62.36	70.69	78.38	86.39	106.81	133.52	164.93

注：表中粗线框内为选取数值。

表 3.3-6　弯曲 90°角时修正值 K

mm

$L = l_1 + l_2 + k$

t \ r	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	63	80	100
0.15	+0.02	-0.01	-0.03	-0.10	-0.23	-0.31	-0.40	-0.53																				
0.20	+0.03	+0.01	-0.02	-0.08	-0.19	-0.27	-0.36	-0.49	-0.70																			
0.25	+0.04	+0.02	0.00	-0.06	-0.16	-0.24	-0.32	-0.45	-0.66	-0.88																		
0.3	+0.04	+0.03	+0.01	-0.04	-0.14	-0.21	-0.29	-0.41	-0.62	-0.84	-1.05																	
0.4		+0.06	+0.04	0.00	-0.09	-0.16	-0.23	-0.35	-0.54	-0.76	-0.97	-1.40																
0.5		+0.08	+0.07	+0.02	-0.05	-0.12	-0.18	-0.28	-0.48	-0.68	-0.88	-1.32	-1.75															
0.6			+0.10	+0.05	-0.02	-0.07	-0.14	-0.24	-0.41	-0.62	-0.82	-1.25	-1.67	-2.10														
0.8				+0.10	+0.03	-0.01	-0.06	-0.15	-0.32	-0.49	-0.69	-1.09	-1.52	-1.95	-2.81													
0.9				+0.13	+0.06	+0.02	-0.03	-0.11	-0.27	-0.44	-0.62	-1.02	-1.44	-1.87	-2.73													
1.0				+0.16	+0.09	+0.04	0.00	-0.08	-0.23	-0.40	-0.57	-0.96	-1.36	-1.79	-2.65	-3.51												
1.2					+0.14	+0.09	+0.05	-0.01	-0.15	-0.31	-0.48	-0.84	-1.24	-1.63	-2.49	-3.35												
1.5					+0.23	+0.18	+0.13	+0.06	-0.05	-0.18	-0.27	-0.68	-1.01	-1.44	-2.26	-3.11	-3.97	-5.26										
1.75						+0.25	+0.19	+0.13	+0.03	-0.10	-0.25	-0.58	-0.91	-1.26	-2.08	-2.92	-3.78	-5.06										
2.0						+0.32	+0.27	+0.20	+0.08	-0.02	-0.16	-0.46	-0.80	-1.13	-1.93	-2.72	-3.58	-4.87	-7.01									
2.5							+0.43	+0.34	+0.22	+0.11	+0.01	-0.26	-0.58	-0.91	-1.61	-2.41	-3.20	-4.47	-6.62	-8.77								
3.0								+0.49	+0.35	+0.24	+0.13	-0.10	-0.36	-0.69	-1.36	-2.08	-2.89	-4.08	-6.23	-8.37	-10.51	-12.66						
3.5									+0.50	+0.36	+0.26	+0.05	-0.21	-0.50	-1.18	-1.82	-2.51	-3.77	-5.84	-7.89	-10.13	-12.27						
4.0									+0.65	+0.51	+0.40	+0.17	-0.04	-0.31	-0.92	-1.59	-2.26	-3.45	-5.44	-7.59	-9.73	-11.88	-14.03					
4.5										+0.66	+0.52	+0.28	+0.09	-0.15	-0.73	-1.36	-2.04	-3.14	-5.13	-7.20	-9.34	-11.49	-13.63	-15.88				
5.0										+0.81	+0.68	+0.44	+0.21	+0.02	-0.53	-1.15	-1.82	-2.83	-4.81	-6.08	-8.95	-11.09	-13.24	-15.39	-17.53			
5.5											+0.82	+0.57	+0.32	+0.15	-0.37	-0.96	-1.59	-2.60	-4.42	-6.49	-8.60	-10.70	-12.85	-14.99	-17.14			
6											+0.97	+0.70	+0.47	+0.25	-0.20	-0.73	-1.38	-2.39	-4.11	-6.17	-8.16	-10.31	-12.46	-14.60	-16.75			
7												+1.00	+0.73	+0.51	+0.11	-0.41	-0.99	-1.93	-3.64	-5.45	-7.59	-9.52	-11.67	-13.82	-15.96	-21.54		
8												+1.30	+1.03	+0.80	+0.34	-0.08	-0.63	-1.52	-3.18	-4.89	-6.97	-8.86	-10.88	-13.03	-15.18	-20.76	-28.05	
9													+1.32	+1.06	+0.55	+0.19	-0.30	-1.14	-2.73	-4.44	-6.37	-8.24	-10.26	-12.25	-14.39	-19.97	-27.27	
10													+1.62	+1.35	+0.89	+0.42	+0.03	-0.77	-2.3	-3.98	-5.65	-7.64	-9.31	-11.62	-13.61	-19.19	-26.48	-35.07

注：粗线以上为负值。

表 3.3-7 弯曲件 $r \geqslant 0.5t$ 时毛坯展开长度的计算公式

弯曲形式	简 图	计 算 公 式
单角弯曲（已知切点尺寸）		$L = l_1 + l_2 + \frac{\pi(180° - \alpha)}{180°}(r + xt) - 2(r + t)$
单角弯曲（已知交点尺寸）		$L = l_1 + l_2 + \frac{\pi(180° - \alpha)}{180°}(r + xt) - 2\cot\frac{\alpha}{2}(r + t)$
单角弯曲（已知中心尺寸）		$L = l_1 + l_2 + \frac{\pi(180° - \alpha)}{180°}(r + xt)$
双直角弯曲		$L = l_1 + l_2 + l_3 + \pi(r + xt)$
四直角弯曲		$L = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + \frac{\pi}{2}(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + \frac{\pi}{2}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)t$
半圆弯曲		$L = l_1 + l_2 + \pi(r + xt)$
铰链卷圆		$L = l + \frac{\pi\alpha}{180°}(r + xt)$
吊环卷圆		$L = 1.5\pi(r + xt) + l_1 + l_2 + l_3$

弯曲变形前的体积是

$$V_0 = LBt \quad (3.3\text{-}12)$$

弯曲变形后的体积是

$$V = (l_1 + l_2)Bt + \frac{\pi t^2}{4}B \quad (3.3\text{-}13)$$

由 $V_0 = V$ 可得

$$L = l_1 + l_2 + \frac{\pi}{4}t \quad (3.3\text{-}14)$$

考虑弯曲时变形区材料变薄，因此按式（3.3-14）计算展开长度时其结果偏大，需要修正。对于形状复杂，弯角个数多和精度要求高的弯曲件，通常需用试验方法最后确定毛坯的展开长度。

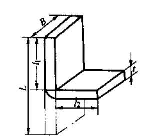


图 3.3-15 无圆角半径弯曲件的展开长度

表 3.3-8 列出弯曲件 $r < 0.5t$ 时，毛坯展开长度的经验计算公式。

表 3.3-8 弯曲件 $r<0.5t$ 时计算毛坯展开长度的经验公式

弯曲形式	简图	计算公式
单角弯曲		$L=l_1+l_2+0.5t$
		$L=l_1+l_2+\frac{\alpha}{90^\circ}\times 0.5t$
		$L=l_1+l_2+t$
双角弯曲		$L=l_1+l_2+l_3+0.5t$
三角弯曲		同时弯曲三个角时：$L=l_1+l_2+l_3+l_4+0.75t$ 先弯二个角后弯另一个角时：$L=l_1+l_2+l_3+l_4+t$
四角弯曲		$L=l_1+l_2+l_3+2l_4+t$

（3）铰链式的弯曲件

图 3.3-16 所示铰链件其圆角 $r=(0.6\sim3.5)t$ 时，常用推卷的方法弯曲成形，在卷圆弯曲的过程中，材料受到挤压和弯曲作用，因此，板料增厚，中性层外移。此时毛坯长度可按式（3.3-15）近似计算：

$$L=l+5.7r+4.7x_1t \qquad (3.3\text{-}15)$$

式中，l 为铰链件直线段长度，mm；r 为铰链的内弯曲半径，mm；x_1 为卷圆时中性层位移系数，其值查表 3.3-9。

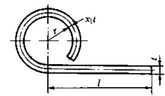


图 3.3-16 铰链式弯曲件

表 3.3-9 卷圆时中性层位移系数 x_1 值

$\frac{r}{t}$	>0.5~0.6	>0.6~0.8	>0.8~1	>1~1.2	>1.2~1.5
x_1	0.76	0.73	0.7	0.67	0.64

$\frac{r}{t}$	>1.5~1.8	>1.8~2	>2~2.2	>2.2
x_1	0.61	0.58	0.54	0.5

（4）棒料弯曲件

棒料弯曲（图 3.3-17）时，当弯曲半径 $r\geq1.5d$ 时，弯曲部分横截面几乎没有变化，中性层系数 x_2 近似为0.5。当 $r<1.5d$ 时，弯曲部分横截面发生了畸变，中性层外移，毛坯展开长度可按式（3.3-16）计算：

$$L=l_1+l_2+\pi(r+x_2d) \qquad (3.3\text{-}16)$$

式中，L 为棒料毛坯展开长度，mm；l_1，l_2 为棒料弯曲件直线段长度，mm；d 为棒料的直径，mm；x_2 为棒料弯曲时中性层位移系数，其值查表3.3-10。

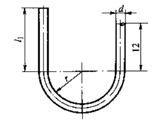


图 3.3-17 棒料弯曲件

表 3.3-10 棒料弯曲时中性层位置系数 x_2 值

r/d	≥1.5	1	0.5	0.25
x_2	0.5	0.51	0.53	0.55

4 弯曲件的回弹

4.1 回弹及影响回弹的因素

弯曲变形也与其他塑性变形一样，弯曲时，在毛坯的变形区里，除产生塑性变形外，也存在有弹性变形。当弯曲工作完成并从模具中取出弯曲件时，外加的载荷消失，原有的弹性变形也随着完全或部分地消失掉，其结果表现为在卸载过程中弯曲毛坯形状与尺寸发生变化。在冲压领域里称这个现象为弹复，也叫回弹。回弹的表现形式有两种，如图 3.3-18 所示。

1）曲率减小。曲率由卸载前的 $\frac{1}{\rho}$ 减小至卸载后的 $\frac{1}{\rho'}$。回弹量 $\Delta k=\frac{1}{\rho}-\frac{1}{\rho'}$。

2）弯曲角减小。弯曲角由卸载前的 α 减小至卸载后的 α'。回弹量 $\Delta\alpha=\alpha-\alpha'$。

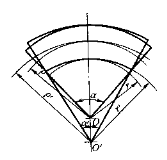


图 3.3-18 弯曲时的回弹

板料弯曲时产生的回弹受多种因素的综合影响，下面对弯曲件回弹影响因素做如下分析。

1）材料的力学性能。材料的屈服点 σ_s 愈高，硬化指数 n 越大，弹性模量 E 愈小，弯曲变形的回弹也愈大。若材料的力学性能不稳定，则回弹值也不稳定。

2）相对弯曲半径 r/t。相对弯曲半径 r/t 减小，则变形程度增大，变形区的总切向变形程度增大。塑性变形在总变形中所占的比例增大，而弹性变形所占比例则相应减小，因而回弹值减小。

3）弯曲角 α。弯曲角 α 愈大，则表示变形区的长度愈

大，回弹积累值愈大，故回弹角 $\Delta\alpha$ 愈大。但对曲率半径的回弹没有影响。

4）弯曲方式及模具结构。不同的弯曲方式和模具结构，对毛坯弯曲过程、受力状态及变形区和非变形区都直接影响回弹。如：在无底凹模内作自由弯曲时，回弹最大；校正弯曲的回弹角小于自由弯曲；U形件弯曲，由于两边受限制其回弹小于V形件。

5）弯曲力。弯曲工艺常采用带有一定校正成分的弯曲方法，校正力的大小对回弹有较大影响，对单角弯曲和双角弯曲的影响也各不相同。

6）模具的几何参数。图3.3-19表示凸、凹模间隙对回弹的影响；图3.3-20表示凸模圆角半径对回弹的影响；图3.3-21表示凹模圆角半径对回弹的影响。

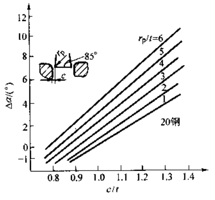


图3.3-19 凸、凹模间隙对回弹的影响

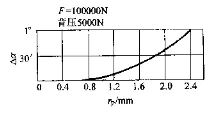


图3.3-20 凸模圆角对回弹的影响

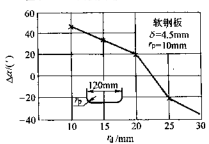


图3.3-21 凹模圆角对回弹的影响

4.2 回弹值的确定

（1）大半径自由弯曲的回弹

当 $r/t \geq 10$ 时，回弹较大，不仅角度有回弹，弯曲半径也有较大变化，可采用计算法得到回弹值。

回弹系数是回弹后工件圆弧部分中心角与回弹前的比，即

$$k = \frac{\alpha'}{\alpha} \tag{3.3-17}$$

回弹前后圆弧长度相等，故

$$\alpha\ (r+0.5t) = \alpha'\ (r'+0.5\delta)$$

$$K = \frac{r+0.5t}{r'+0.5t} \tag{3.3-18}$$

式中，K 为回弹系数；r' 为回弹后工件内表面圆角半径，mm；r 为回弹前工件内表面圆角半径，相当于凸模圆角半径，mm；α'为回弹后工件圆弧所对中心角，(°)；α 为回弹前工件圆弧所对中心角，(°)；t 为工件板料厚度，mm。

r'、α'和 t 可以从工件图上得到，若知道 K 值，即可算出凸模工作部分的尺寸 r 或α。常用材料的回弹系数 K 可以从图3.3-22查出。

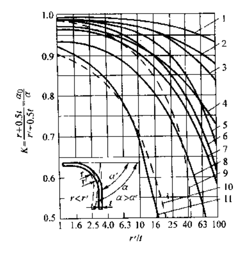


图3.3-22 回弹系数

1—软铝；2—硬铝（铝、铜、镁合金及铝、锌、铜、镁合金）软态；3—10钢；4—黄铜；5—Q235钢；6—纯铜；7—防锈铝（铝、镁、硅合金）；6—硬铝（铝、锌、铜、镁合金），时效硬化（淬火）；9—18－8铬、镍不锈钢，退火；10—18－8铬、镍不锈钢，时效硬化；11—硬铝（铝、铜、镁合金），时效硬化

图3.3-22中无法查得的材料，K 值取

$$K = 1 - \frac{3C\sigma_b\ (r'+0.5t)}{E\delta} \tag{3.3-19}$$

式中，E 为弹性模量，MPa；σ_b 为材料抗拉强度，MPa；C 为系数，查表3.3-11。

表3.3-11 系数 C 数值

$\frac{2L}{\delta}$	10	15～20	25～30	40～50
C	1.3	1.2	1.15	1.1

非V形弯曲件，K 按式（3.3-20）估算。

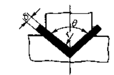
$$K = 1 - \left[0.001\ \left(\frac{\sigma_s+\sigma_b}{2}\right) + 0.000\ 001\ 5\ \left(\frac{\omega_s+\sigma_b}{2}\right)\left(\frac{r'}{t}\right)^2\right] \tag{3.3-20}$$

式中，σ_s 为材料屈服点，MPa；σ_b 为材料抗拉强度，MPa；r'为回弹后工件内表面圆角半径，mm；t 为工件板料的厚度，mm。

（2）小半径自由弯曲的回弹

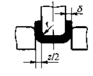
当 $r/t < 6$ 时，弯曲半径的变化值不大，故只考虑角度的回弹。其值可按表3.3-12和表3.3-13查得。

表 3.3-12　V 形弯曲回弹角



材料的牌号和状态	$\frac{r}{\delta}$	弯曲角度 θ						
		150°	135°	120°	105°	90°	60°	30°
		回弹角度 Δθ						
LY12Y	2	2°	2°30′	3°30′	4°	4°30′	6°	7°30′
	3	3°	3°30′	4°	5°	6°	7°30′	9°
	4	3°30′	4°30′	5°	6°	7°30′	9°	10°30′
	5	4°30′	5°30′	6°30′	7°30′	8°30′	10°	11°30′
	6	5°30′	6°30′	7°30′	8°30′	9°30′	11°30′	13°30′
LY12M	2	0°30′	1°	1°30′	2°	2°	2°30′	3°
	3	1°	1°30′	2°	2°30′	2°30′	3°	4°30′
	4	1°30′	1°30′	2°	2°30′	3°	4°30′	5°
	5	1°30′	2°	2°30′	3°	4°	5°	6°
	6	2°30′	3°	3°30′	4°	4°30′	5°30′	6°30′
LC4Y	3	5°	6°	7°	8°	8°30′	9°	11°30′
	4	6°	7°30′	8°	8°30′	9°	12°	14°
	5	7°	8°	8°30′	10°	11°30′	13°30′	16°
	6	7°30′	8°30′	10°	12°	13°30′	15°30′	18°
LC4M	2	1°	1°30′	1°30′	2°	2°30′	3°	3°30′
	3	1°30′	2°	2°30′	2°	3°	3°30′	4°
	4	2°	2°30′	3°	3°	3°30′	4°	4°30′
	5	2°30′	3°	3°30′	3°30′	4°	5°	6°
	6	3°	3°30′	4°	4°	5°	6°	7°
20（已退火）	1	0°30′	1°	1°	1°30′	1°30′	2°	2°30′
	2	0°30′	1°	1°30′	2°	2°	3°	3°30′
	3	1°	1°30′	2°	2°	2°30′	3°30′	4°
	4	1°	1°30′	2°	2°30′	3°	4°	5°
	5	1°30′	2°	2°30′	3°	3°30′	4°30′	5°30′
	6	1°30′	2°	2°30′	3°	4°	5°	6°
30CrMnSiA（已退火的）	1	0°30′	1°	1°	1°30′	2°	2°30′	3°
	2	0°30′	1°30′	1°30′	2°	2°30′	3°30′	4°30′
	3	1°	1°30′	2°	2°30′	3°	4°	5°30′
	4	1°30′	2°	3°	3°30′	4°	5°	6°30′
	5	2°	2°30′	3°	4°	4°30′	5°30′	7°
	6	2°30′	3°	4°	4°30′	5°30′	6°30′	8°
1Cr18Ni9Ti	0.5	0°	0°	0°30′	0°30′	1°	1°30′	2°
	1	0°30′	0°30′	1°	1°	1°30′	2°	2°30′
	2	0°30′	1°	1°30′	1°30′	2°	2°30′	3°
	3	1°	1°	2°	2°	2°30′	3°30′	4°
	4	1°	1°30′	2°30′	3°	3°30′	4°	4°30′
	5	1°30′	2°	3°	3°30′	4°	4°30′	5°30′
	6	2°	3°	3°30′	4°	4°30′	5°30′	6°30′

表 3.3-13 U 形弯曲回弹角



材料的牌号和状态	$\frac{r}{\delta}$	凹模和凸模的间隙 z/2						
		0.8δ	0.9δ	1δ	1.1δ	1.2δ	1.3δ	1.4δ
		回弹角度 Δθ						
LY12Y	2	-2°	0°	2°30′	5°	7°30′	10°	12°
	3	-1°	1°30′	4°	6°30′	9°30′	12°	14°
	4	0°	3°	5°30′	8°30′	11°30′	14°	16°30′
	5	1°	4°	7°	10°	12°30′	15°	18°
	6	2°	5°	8°	11°	13°30′	16°30′	19°30′
LY12M	2	-1°30′	0°	1°30′	3°	5°	7°	8°30′
	3	-1°30′	0°30′	2°30′	4°	6°	8°	9°30′
	4	-1°	1°	3°	4°30′	6°30′	9°	10°30′
	5	-1°	1°	3°	5°	7°	9°30′	11°
	6	-0°30′	1°30′	3°30′	6°	8°	10°	12°
LC4Y	3	3°	7°	10°	12°30′	14°	16°	17°
	4	4°	8°	11°	13°30′	15°	17°	18°
	5	5°	9°	12°	14°	16°	18°	20°
	6	6°	10°	13°	15°	17°	20°	23°
LC4M	2	-3°	-2°	0°	3°	5°	6°30′	8°
	3	-2°	-1°30′	2°	3°30′	6°30′	8°	9°
	4	-1°30′	-1°	2°30′	4°30′	7°	8°30′	10°
	5	-1°	-1°	3°	5°30′	8°	9°	11°
	6	-0°	-0°30′	3°30′	6°30′	8°30′	10°	12°
20 (已退火的)	1	-2°30′	-1°	0°30′	1°30′	3°	4°	5°
	2	-2°	-0°30′	1°	2°	3°30′	5°	6°
	3	-1°30′	0°	1°30′	3°	4°30′	6°	7°30′
	4	-1°	0°30′	2°30′	4°	5°30′	7°	9°
	5	-0°30′	1°30′	3°	5°	6°30′	8°	10°
	6	-0°30′	2°	4°	6°	7°30′	9°	11°
30CrMnSiA	1	-1°	-0°30′	0°	1°	2°	4°	5°
	2	-2°	-1°	1°	2°	4°	5°30′	7°
	3	-1°30′	0°	2°	3°30′	5°	6°30′	8°30′
	4	-0°30′	1°	3°	5°	6°30′	8°30′	10°
	5	0°	1°30′	4°	6°	8°	10°	11°
	6	0°30′	2°	5°	7°	9°	11°	13°

(3) 校正性弯曲的回弹

校正性弯曲时，由于板料受径向压应力作用，扩大了弯曲件内部的塑性变形区，从而减少了回弹量，其回弹角比自由弯曲时大大减少。一般情况下，校正弯曲力愈大，回弹愈小；当校正弯曲力达到一定值后，回弹即趋稳定，若再增大校正力，对改善回弹作用不大。图 3.3-23 表示了校正力对回弹角的影响。

当弯曲角为 90°时，校正性弯曲回弹角可用表 3.3-14 所列的试验公式计算。

4.3 防止回弹的措施

在生产中，为了防止弯曲件出现质量问题，提高弯曲件

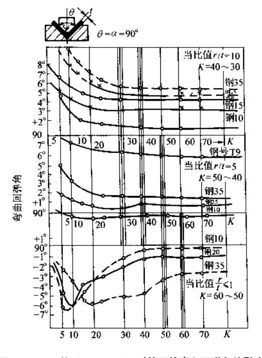


图 3.3-23 K 值（$K = F_j/F_z$）对校正性弯曲回弹角的影响

的精度，通常采取如下措施防止回弹。

表 3.3-14 校正性弯曲的回弹角

弯曲角 α	板料的含碳量 Wc			
	0.10%	0.15% ~ 0.20%	0.25% ~ 0.30%	0.35%
90°	$\Delta\alpha = 0.43\frac{r}{t} - 0.61$	$\Delta\alpha = 0.43\frac{r}{t} - 0.36$	$\Delta\alpha = 0.78\frac{r}{t} - 0.79$	$\Delta\alpha = 0.79\frac{r}{t} - 1.62$

(1) 改善工装结构和工艺方法

1) 在接近纯塑性弯曲的条件下，弯曲回弹值趋于稳定，此时可根据得到的回弹值，对模具工作部分的几何形状作相应的修正。

2) 利用弯曲毛坯不同部位的回弹规律，适当地调整各种影响因素（模具的圆角半径，间隙，开口密度，顶件板的反压，校正力等）来抵消回弹。

图 3.3-24 是将凸模端面和顶件板做成弧形，卸载时利用弯曲件底部的回弹来补偿两个圆角部分的回弹。

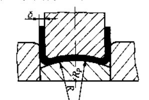
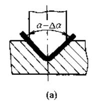


图 3.3-24 弧形凸模的补偿作用

图 3.3-25 是在 V 形件弯曲时，可以根据工件可能产生的回弹值，将凸模弯曲角预先做小，或将凸模与顶板做出等于回弹角向上的倾斜角，以补偿回弹作用。

3) 利用聚氨酯软凹模取代金属刚性凹模（见图 3.3-26)，通过调节压入软凹模深度来控制弯曲角。

用软模成形时，能将压力均匀地传递到材料上，使弯曲工件与金属凸模完全贴合，其回弹量比金属凹模小得多（见图 3.3-27)。



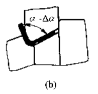


图 3.3-25 V 形弯曲件回弹的补偿

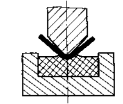


图 3.3-26 弹性凹模弯曲

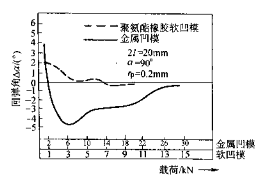


图 3.3-27 两种模具弯曲件回弹角对比

4) 将弯曲凸模做成局部突起的形状或减小圆角部分的模具间隙，使凸模力集中作用在弯曲变形区，改变变形区的应力状态，改变了回弹性质，达到减小回弹的目的。

如图 3.3-28、图 3.3-29、图 3.3-30 所示。

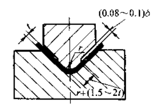


图 3.3-28 凸模局部突起的单角弯曲

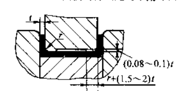


图 3.3-29 凸模局部突起的双角弯曲

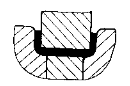


图 3.3-30 圆角部分间隙减小的弯曲

5) 采用带摆动块的凹模结构，如图 3.3-31 所示。



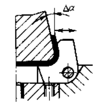


图 3.3-31 带摆动块的凹模

6）采用纵向加压法，在弯曲过程完成之后，用模具的凸肩在弯曲毛坯的纵向加压，使弯曲变形区内毛坯断面上受压应力，从而可减小弯曲回弹，并获得精确的弯边高度，如图 3.3-32 所示。

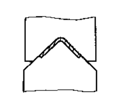
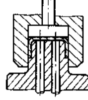



图 3.3-32 纵向加压的弯曲

7）采用拉弯。当弯曲大圆弧的零件时，由于相对弯曲半径 r/t 很大，变形区大部分或全部处于弹性变形范围内，回弹很大，工件难以成形。这时可采用拉弯工艺。拉弯时所加的切向拉伸力大小应使弯曲件内表面的合成应力大于材料的屈服点 σ_s。拉弯工艺不仅加大了弯曲件的塑性变形量，而且使工件整个横断面都处于塑性拉伸变形范围。因此，在卸载后，工件的回弹量大为减小。

拉弯工艺可以在专用拉弯机上进行（见图 3.3-33），也可以用拉弯模在通用压力机上进行。拉弯模结构如图 3.3-34 所示。

拉弯时，毛坯断面内的切向应力分布如图 3.3-35 所示。

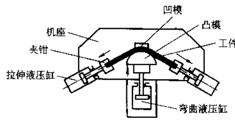


图 3.3-33 专用拉弯机示意图

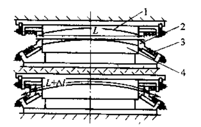


图 3.3-34 拉弯模

1—上模；2—夹子；3—弹簧；4—下模

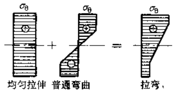


图 3.3-35 拉弯时断面内的切向应力分布

(2) 提高工件的刚度

在工件设计上改进某些结构，可提高制品的刚度，使回弹角减小。

图 3.3-36～图 3.3-39 所示，都有提高工件刚度的作用。

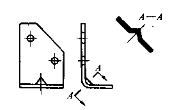


图 3.3-36 在弯角部位加三角肋

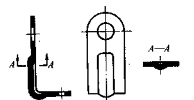


图 3.3-37 在弯角部位加条形肋

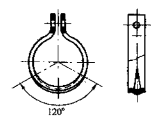


图 3.3-38 在环箍上加肋

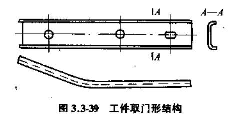


图 3.3-39 工件取门形结构

5 弯曲模工作部分尺寸计算

弯曲模工作部分的尺寸主要指凸模、凹模的圆角半径和凹模的深度。U 形件弯曲模还须确定凸、凹模之间的间隙。

5.1 凸、凹模的圆角半径

1）凸模圆角半径 r_p。当相对弯曲半径 r/t 较小时，凸模圆角半径就等于弯曲件的弯曲半径，但不能小于材料所允许的最小弯曲半径 r_{min}。

$$r_p = r \geqslant r_{min} \tag{3.3-21}$$

若因弯曲件结构需要，出现弯曲半径 $r < r_{min}$ 的情况时，则应使凸模圆角半径大于或等于最小弯曲半径（$r_p \geqslant r_{min}$），最后经整形工序达到弯曲半径，整形凸模的 $r_p = r$。

当相对弯曲半径较大（$r/t > 10$）时，则应考虑回弹的影响，凸模圆角半径应根据回弹值大小作相应的修正，$\Delta r = r' - r$，预先将 r_p 修小 Δr。

2）凹模圆角半径 r_d。凹模圆角半径的大小直接影响毛坯的成形，若取值过小，材料表面会出现划伤，甚至出现压痕，凹模圆角半径 r_d 一般不应小于 3 mm。

实际生产中，凹模圆角半径通常按板料厚度 t 选取（如

图 3.3-40)

$t<0.5$ mm　　$r_d=(6\sim12)\ t$

$t=0.5\sim2$ mm　　$r_d=(3\sim6)\ t$

$t=2\sim4$ mm　　$r_d=(2\sim3)\ t$

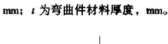
$t>4$ mm　　$r_d=(1.5\sim2.5)\ t$

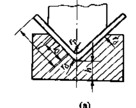
凹模两边圆角半径应一致，否则在弯曲时毛坯会发生偏移。

V形件弯曲凹模的底部可开退刀槽或按式 3.3-22 取 r 圆角半径

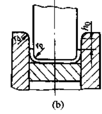
$$r'_d=(0.6\sim0.8)(r_p+t) \tag{3.3-22}$$

式中，r'_d 为凹模底部圆角半径，mm；r_p 为凸模圆角半径，mm；t 为弯曲件材料厚度，mm。





(a)



(b)

(c)

图 3.3-40　弯曲模结构尺寸

5.2　凹模的工作深度

弯曲凹模的工作深度的大小与弯曲件的形状，尺寸及弯曲方式有关。弯曲凹模深度要适当。若过小，则工件两端直边的自由部分太多，弯曲件回弹大，不平直，影响工件质量。若过大，则多消耗模具材料，而且需较大的冲压行程。

V形件弯曲时，凹模工作深度及底部最小厚度如图 3.3-40a 所示，其数值查表 3.3-15。

U形件弯曲时，若弯边高度不大或要求两边平直，则凹模深度应大于工件的高度，如图 3.3-40b 所示。图 3.3-40b 中 h_0 值查表 3.3-16。若弯曲件直边较长，而对平直要求不高时，可采用图 3.3-40c 所示结构，凹模深度值查表 3.3-17。

表 3.3-15　弯曲 V 形件的凹模深度及底部最小厚度值　mm

弯曲件边长 l	板料厚度 t					
	≤2		2~4		>4	
	h	l_0	h	l_0	h	l_0
10~25	20	10~15	22	15	—	—
>25~50	22	15~20	27	25	32	30
>50~75	27	20~25	32	30	37	35
>75~100	32	25~30	37	35	42	40
>100~150	37	30~35	42	40	47	50

表 3.3-16　弯曲 U 形件凹模深度值 (h_0)　mm

板料厚度 t	≤1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~10
h_0	3	4	5	6	8	10	15	20	25

表 3.3-17　弯曲 U 形件凹模深度值 (l_0)　mm

弯曲件边长 l	板料厚度 t				
	<1	>1~2	>2~4	>4~6	>6~10
<50	15	20	25	30	35
50~75	20	25	30	35	40
75~100	25	30	35	40	40
100~150	30	35	40	50	50
150~200	40	45	55	65	65

5.3　凸、凹模的间隙

V形件弯曲时，凸、凹模的间隙靠调整压力机的闭合高度来控制，不需要在设计和制造模具时确定。

U形件弯曲时，凸、凹模间隙的大小对工件质量和弯曲力有很大的影响。间隙愈小，则弯曲力愈大；间隙过小，会使工件边部板料厚度减薄，降低模具使用寿命；间隙过大，则将引起回弹增大，降低工件的精度。因此，必须确定合理的间隙值。凸、凹模单边间隙 C 可用式 3.3-23 计算：

$$C=t_{max}+xt=t+\Delta+xt \tag{3.3-23}$$

式中，C 为凸、凹模单边间隙，mm；t 为工件材料厚度的基本尺寸，mm；Δ 为板料厚度的正偏差，mm；x 为弯曲间隙系数，其值查表 3.3-18。

表 3.3-18　U形件弯曲模凸、凹模的间隙系数 x 值　mm

弯曲件高度 h	$b/h\leq2$				$b/h\geq2$				
	板料厚度 t								
	<0.5	0.6~2	2.1~4	4.1~5	<0.5	0.6~2	2.1~4	4.1~7.6	7.6~12
10	0.05	0.05	0.04	—	0.10	0.10	0.08	—	—
20	0.05	0.05	0.04	0.03	0.10	0.10	0.08	0.06	0.06
35	0.07	0.05	0.04	0.03	0.15	0.10	0.08	0.06	0.06
50	0.10	0.07	0.05	0.04	0.20	0.15	0.10	0.06	0.06
70	0.10	0.07	0.05	0.05	0.20	0.15	0.10	0.10	0.08
100	—	0.07	0.05	0.05	—	0.15	0.10	0.10	0.08
150	—	0.10	0.07	0.05	—	0.20	0.15	0.10	0.10
200	—	0.10	0.07	0.07	—	0.20	0.15	0.15	0.10

注：b 为弯曲件宽度，h 为弯曲件高度。

当工件精度要求较高时，其间隙应适当缩小，可取 $C=t$。在某些情况下，甚至可选略小于材料厚（$C<t$）的负间隙。

5.4　凹模工作部分尺寸计算及制造公差的确定

U形件弯曲模的凸、凹模工作部分尺寸和公差的确定与弯曲件的尺寸标注有关。

(1) 弯曲件标注外形尺寸

如图 3.3-41，这种情况应以凹模为基准件，先确定凹模尺寸，再根据凸、凹模间隙确定凸模尺寸。

1）当工件为双向偏差时（见图3.3-41a），凹模尺寸为：

$$L_d = (L-0.5\Delta)^{+\delta_d}_{0} \tag{3.3-24}$$

2）当工件为单向偏差时（见图3.3-41b），凹模尺寸为：

$$L_d = (L-0.75\Delta)^{+\delta_d}_{0} \tag{3.3-25}$$

3）凸模尺寸均为：

$$L_p = (L_d-2C)^{0}_{-\delta_p} \tag{3.3-26}$$

（2）弯曲件标注内形尺寸

如图3.3-42，以凸模为基准件，先确定凸模尺寸。

1）当工件为双向偏差时（见图3.3-42a），凸模尺寸为：

$$L_p = (L+0.5\Delta)^{0}_{-\delta_p} \tag{3.3-27}$$

2）当工件为单向偏差时（见图3.3-42b），凸模尺寸为：

$$L_p = (L+0.75\Delta)^{0}_{-\delta_p} \tag{3.3-28}$$

3）凹模尺寸均为：

$$L_d = (L_p+2C)^{+\delta_d}_{0} \tag{3.3-29}$$

式（3.3-24）～式（3.3-29）中，L_d 为凹模工作部分尺寸，mm；L_p 为凸模工作部分尺寸，mm；L 为弯曲件的基本尺寸，mm；Δ 为弯曲件尺寸公差，mm；C 为凸、凹模之间的单边间隙，mm；δ_p、δ_d 为凸模、凹模的制造公差，采用IT7～IT9标准公差等级。

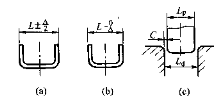


图3.3-41 用外形尺寸标注的弯曲件

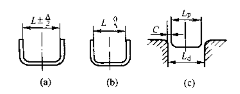


图3.3-42 用内形尺寸标注的弯曲件

6 弯曲力的计算

6.1 自由弯曲时的弯曲力

V形弯曲件其弯曲力为：

$$F_1 = \frac{0.6KBt^2\sigma_b}{r+t} \tag{3.3-30}$$

U形弯曲件的弯曲力为：

$$F_1 = \frac{0.7KBt^2\sigma_b}{r+t} \tag{3.3-31}$$

式中，F_1 为自由弯曲力，N；B 为弯曲件的宽度，mm；t 为弯曲件材料的厚度，mm；r 为弯曲半径，mm；σ_b 为弯曲件材料抗拉强度，MPa；K 为安全系数，可取1.3。

根据 r/t 比值，弯曲件断面积 Bt 以及抗拉强度 σ_b，也可从图3.3-43（V形弯曲件）或图3.3-44（U形弯曲件）直接查出自由弯曲力。

6.2 校正弯曲时的弯曲力

为了提高弯曲件的精度，在弯曲的终了阶段对弯曲件的圆角及直边进行精压，称为校正弯曲。校正弯曲时的弯曲力可用式（3.3-32）计算：

$$F_2 = fA \tag{3.3-32}$$

式中，F_2 为校正弯曲力，N；A 为校正部分投影面积，mm²；f 为单位面积上的校正力，MPa，按表3.3-19选取。

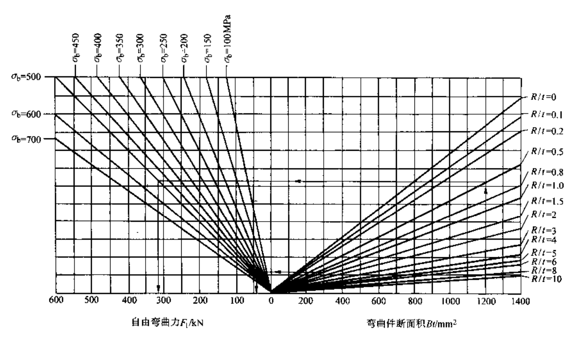


图3.3-43 V形弯曲件自由弯曲力图表

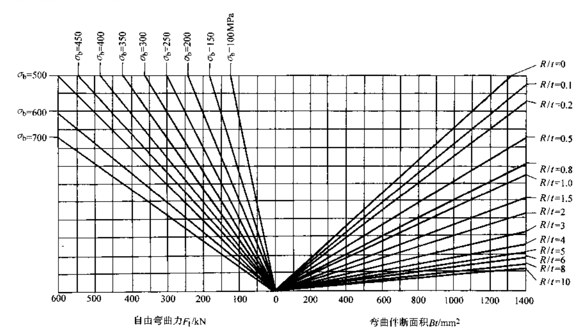


图 3.3-44　U 形弯曲件自由弯曲力图表

表 3.3-19　单位校正力 f 值　　MPa

材　料	材料厚度/mm			
	≤1	>1~2	>2~5	>5~10
铝	10~15	15~20	20~30	30~40
黄　铜	15~20	20~30	30~40	40~60
10~20 钢	20~30	30~40	40~60	60~80
25~35 钢	30~40	40~50	50~70	70~100

6.3　顶件力和压料力

顶件力或压料力 F_3 之值可近似取自由弯曲力的 39%~80%，即

$$F_3 = kF_1 \tag{3.3-33}$$

式中，F_3 为顶件力或压料力，N；F_1 为自由弯曲力，N；K 为系数，可查表 3.3-20。

表 3.3-20　系数 K 值

用　途	弯曲件复杂程度	
	简单	复杂
顶件	0.1~0.2	0.2~0.4
压料	0.3~0.5	0.5~0.8

6.4　弯曲设备选择

（1）自由弯曲

$$F_{压机} \geqslant (1.1\sim1.2)(F_1 + F_3) \tag{3.3-34}$$

式中，$F_{压机}$ 为压力机公称压力，kN。

（2）校正弯曲

$$F_{压机} \geqslant (1.1\sim1.2)\ F_2 \tag{3.3-35}$$

7　弯曲模结构设计

7.1　弯曲模设计要点

弯曲模结构设计应在选定弯曲件工艺方案的基础上进行，为了保证达到工件的要求，在进行弯曲模的结构设计时，必须注意以下几点：

1）坯料放置在模具上应定位可靠。

2）在弯曲过程中，应防止毛坯的滑动。

3）为了减小回弹，在弯曲结束时应使工件在模具中得到校正。

4）模具结构应考虑到制造与维修中减小回弹的可能。

5）毛坯放入模具中和弯曲后从模具中取出工件要方便。

6）应根据制件批量选用模具结构与模具材料。

几种常见的弯曲件的模具结构特征分述如下。

（1）单角弯曲

单角自由弯曲，在弯曲中是最简单的一种，如图 3.3-45 所示。

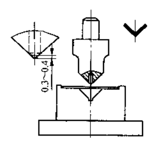


图 3.3-45　单角自由弯曲模

这类弯曲模，由于弯曲时板料易于偏移，制品直边长度尺寸精度较差，但这类结构对料厚公差要求不高，因而弯曲件的角度比较一致。

带有弹压装置的弯曲模（见图 3.3-46），这类弯曲模在弯曲过程中，凸模与弹压装置始终紧压坯料，使其不易错动，故弯曲件的尺寸精度高。弹压力大时，被压部位比较平整。这类模具特别适于带孔工件的制造，以孔为定位孔。

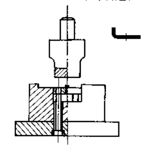


图 3.3-46　带有弹压装置的弯曲模



(2) 双角弯曲

在相反方向有两个弯角时，其弯曲方法与单角弯曲相似，每次弯曲一角，分两次弯曲成形。图3.3-47所示带弹压装置的Z形两角弯曲模，在压料装置上设有沟槽，先弯工件 *a* 端，然后把 *a* 端插入沟槽中，弯 *b* 端。

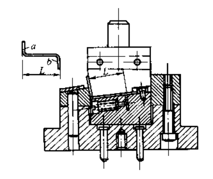


图3.3-47 带有弹压装置的Z形两角弯曲模

图3.3-48a所示为U形件的弯曲模，压弯时压料板将毛坯压住，弯曲后将工件顶起，如工件卡在凸模上，便由推杆推下。

图3.3-48b所示闭角双角弯曲模，用以弯制夹角小于90°的U形件，压弯时凸模首先将毛坯弯曲成V形，当凸模继续下压时，凸模与活动凹模相接触并使左右活动凹模绕中心向内旋转，最后使毛坯压弯成形。当凸模上升后，弹簧使活动凹模复位，工件从垂直于图面方向卸下。

(3) 多角弯曲

多角弯曲件的弯曲方法，因制件材料厚度、圆角半径、工件高度和尺寸精度的不同而有所不同。

1) 一次成形四角弯曲件（如图3.3-49）。这类模具结构简单，应用普遍。一般工件高度不应大于材料厚度的8～10倍，弯曲部分圆角尽可能大，料厚一般小于1 mm。

2) 一次成形摆块式弯曲模（如图3.3-50）。应用这种结构，要求弯曲圆角半径很小，材料厚度小于1 mm，工件高度不大于材料厚度8～10倍。其特点是采用摆动式凹模结构，两模能绕销转动，工作前由缓冲器通过顶杆将它顶起。

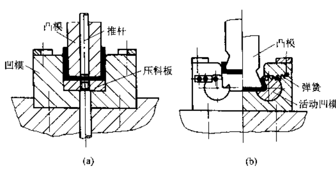
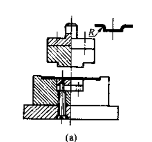


图3.3-48 U形件弯曲模

3) 弯边较高，外侧弯曲圆角半径很小，角度公差要求很严的四角弯曲件，必须采用两道工序来成形。如图3.3-51所示，首先弯曲外角，然后弯曲内角。采用这种方法，工件高度为料厚的12～15倍，以免模具壁部太薄，强度不够。



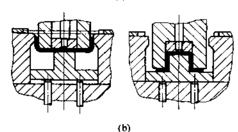


图3.3-49 一次成形四角弯曲模

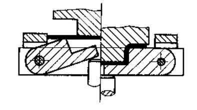


图3.3-50 摆块式弯曲模

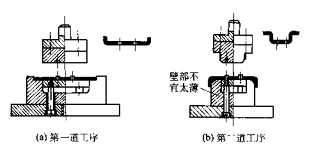


图3.3-51 高边小圆角两道工序弯曲模

(4) 圆筒形件弯曲模

圆筒直径 $d \leqslant 5$ mm 属于小圆，$d \geqslant 20$ mm 的属于大圆。用简单模弯制小圆或大圆需二道工序。弯小圆为：第一道工序先弯成U形，第二道工序再由U形弯成O形，其模具结构如图3.3-52a所示。弯大圆时，第一道工序先压成波浪形，第二道工序再压成圆筒形，其模具结构如图3.3-52b所示。

采用一次压弯成形的方法很多，图3.3-52c是其中一种形式，采用摆动凹模结构一次压圆。工作时，凸模首先将毛坯压成U形，凸模继续下压并压住凹模块的底部，于是凹模块绕销轴摆动最后压弯成圆形。



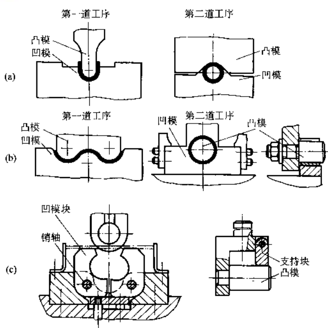


图 3.3-52 圆筒形件弯曲模

(5) 铰链件弯曲模

铰链件通常将毛坯头部预压弯然后才能卷圆。

预压弯模如图 3.3-53a 所示。

卷圆模结构如图 3.3-53b、c 所示。图 3.3-53b 为立式弯曲，模具结构简单。图 3.3-53c 是利用斜楔对凹模作用在水平方向进行卷圆，有压料装置，结构较复杂，但弯曲件的质量较好。

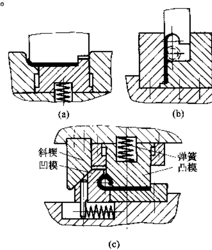


图 3.3-53 铰链件弯曲模

(6) 圆棒件弯曲模

图 3.3-54 所示为圆棒件弯曲模，凸模和凹模的工作部分相应开有圆槽，以防止压弯时圆棒料的移动。为了减少弯曲过程圆棒坯料和凹模圆角处的相对摩擦，提高凹模使用寿命，凹模两侧做成滚轮式。

7.2 常见弯曲模结构介绍

(1) 油孔夹环弯曲模

图 3.3-55 所示为油孔夹环弯曲模。图 3.3-56 所示为弯曲件。

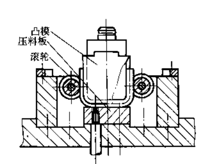


图 3.3-54 棒料弯曲模

此模具把坯料一次弯曲成形，并能自动卸料。

坯料放在成形夹块 8 上，当压力机滑块开始下降时，后斜楔 19 沿后盖板 18 下降，推动滑轮 20、平滑块 21 向前移动，平滑块 21 压滑轮 22、纵滑块 24 下降，使凸模 26 一起下冲。滑轮 31 沿卸料斜楔 30 下降并后移，带动卸料棒 25，卸料圈 27 向后移动。凸模 26 压坯料、芯子 28 一起下降，将坯料弯曲成 U 形并压出底部一凹圆。压力机滑块继续下降，斜楔 7 推动滑轮 6、成形夹块 8 向中间移动，把坯料弯曲成形。

当压力机滑块上升时，斜楔 7 回上，成形夹块 8、滑轮 6、滑座 5 在弹簧作用下向外移开，回至原位。后斜楔 19 上升，滑轮 20、平滑块 21 在弹簧 23 作用下向后移至原位。在弹顶器作用下，滑轮 22、纵滑块 24、凸模也升至原位，滑轮 31 在拉簧 32 作用下，使卸料棒 25、卸料圈 27 向前移动，把工件从凸模上推出。

(2) 放大器安装板弯曲模

图 3.3-57 所示为放大器安装板弯曲模。图 3.3-58 所示为弯曲件。

此模具供弯曲板料突边用。

冲件放在下垫板 4 上，由定位销 7、8 定位，压力机滑块下降时，凸模 11 先压住工件，斜楔 6 下降，推动滑块 9、5 同时向中间移动，对工件进行弯曲。

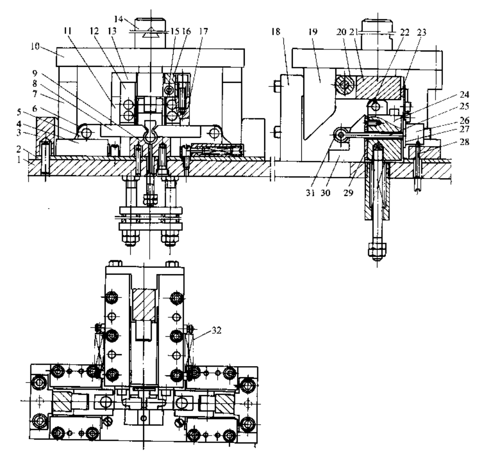


图 3.3-55 油孔夹环弯曲模

1—下模座；2—垫板；3—挡块；4—导轨；5—滑座；6、20、22、31—滑轮；7—斜楔；8—成形夹块；9—下模；10—盖板；11—左导轨；12—左定位块；13—左压板；14—模柄；15—右定位块；16—右压板；17—右导轨；18—后盖板；19—后斜楔；21—平滑块；23—弹簧；24—纵滑块；25—卸料棒；26—凸模；27—卸料圈；28—芯子；29—卸料导轨；30—卸料斜楔；32—拉簧

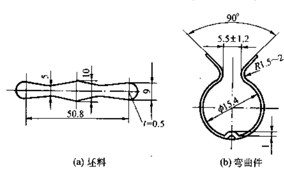


图 3.3-56 弯曲件

压力机滑块上升时，斜楔6回上，滑块9、5在弹簧作用下复至原位，凸模11回上，取下冲件。

(3) 弹簧片弯曲模

图 3.3-59 所示为弹簧片弯曲模。

坯料放在左、右活动凹模5、9及顶板8的平面上，由定位板6定位。压力机滑块下降时，凸模4压住坯料、顶板8下降，把坯料压弯成V形。滑块继续下降，弹簧1被压缩，使凸模不再下降。斜楔2推动活动凹模5、9向中间移动，把坯料弯曲成形。压力机滑块上升时，料楔2先回上，在弹簧10的作用下，左、右凹模向两旁移开，退至原位，顶板8也升至原位。

(4) 导向板弯曲模

图 3.3-60 所示为导向板弯曲模。

坯料由定位销3定位。凹模2下冲时，压顶板4一起下降，把冲件弯曲成形。凹模上升时，顶杆6把顶板4顶至起始位置，即可取下工件。

此模具结构简单。

(5) 铰链卷边模

图 3.3-61 所示为铰链卷边模。此冲模供铰链卷边用，结构简单，成形亦较可靠。各种典型零件如图 3.3-62 所示。

工作时把坯料直立放入定位块3与凸模2之槽中，凸模下冲时，将坯料先压成小弯。继续将第二个坯料送入，第一个工件就被推到成形位置，凸模第二次下冲，把冲件卷成铰链。这样依次将坯料送入，即可连续压弯成形。定位块3做成两边有台肩，可供压弯两种不同高度的工件。

卷边过程如图 3.3-63 所示。

如果坯料弯制的形状与卷圆的半径不同，将成废品，如图 3.3-64 所示。

(6) 卷圆模

图 3.3-65 所示为卷圆模

此模具适用于薄料工件的卷圆，冲压过程中有两个弯曲动作。

坯料放在滑块4上，由定位板3定位。压力机滑块下降时，凸模1和顶杆10先把坯料压紧，凸模1下降至顶板5，把坯料弯成U形。然后凸模1压坯料、顶板5一起下降，使滑块6向外移动，滑块4向中间移动，把U形卷成圆。压力机滑块上升时，在弹顶器和弹簧8的作用下，顶杆10、顶板5、滑块4、6都移至原位。

垫筒7可调节模具闭合高度。



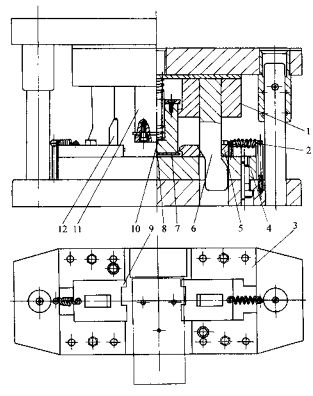


图 3.3-57　放大器安装板弯曲模

1—固定板；2、10—弹簧；3—导板；4—下垫板；5—右滑块；6—斜楔；7、8—定位销；9—左滑块；11—凸模；12—限位柱

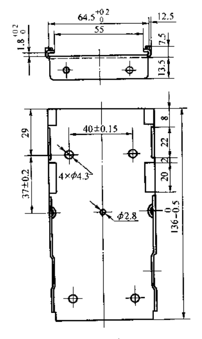


图 3.3-58　弯曲件

材料：10 号钢

(7) 门形件弯形与校正模

图 3.3－66 所示为门形件弯形与校正模。

此冲模供冲制与校正门形工件用，可使冲件外形尺寸达到较高的精确度。

坯料放在顶板 3 上由定位板 4 定位，压力机滑块下降时，凸模 5 先压紧坯料，然后把坯料弯成 U 形，最后凸模 5 受斜楔 7 的作用被外挤，使冲件外形校正到正确的尺寸。

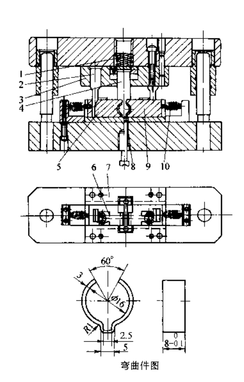


图 3.3-59　弹簧片弯曲模

1—弹簧；2—斜楔；3—固定框；4—凸模；5—左活动凹模；6—定位板；7—导轨；8—顶板；9—右活动凹模；10—拉簧

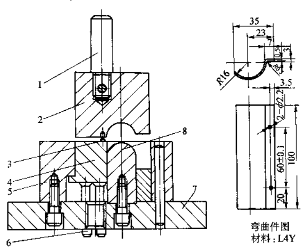


图 3.3-60　导向板弯曲模

1—模柄；2—凹模；3—定位销；4—顶板；5—模框；6—顶杆；7—下模座；8—凸模

压力机滑块上升时，冲件被顶板 3 顶出，凸模 5 在弹簧 9 的作用下移至原位。

(8) 管夹弯模

图 3.3-67 所示为管夹弯模。

坯料放在滑块 5 上，由定位板 2 定位。压力机滑块下降时，心轴 11 压住坯料、顶板 6 一起下降，把坯料压弯成 U 形，继续下降时，斜楔 8 推动滑块 5 向中间移动，把坯料弯曲成形。压力机滑块上升时，滑块 5 在弹簧的作用下，退至原来的位置，联板 7 上升，将手柄 12 向外拉动，冲件即从心轴 11 上卸下。

限位柱 1 起限制冲程作用。

此种结构较适用于薄料冲件的弯曲。

(9) C 形件弯模

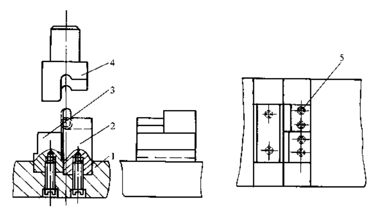


图 3.3-61 铰链卷边模

1—下模座；2—凸模；3—定位块；4—凹模；5—凸模

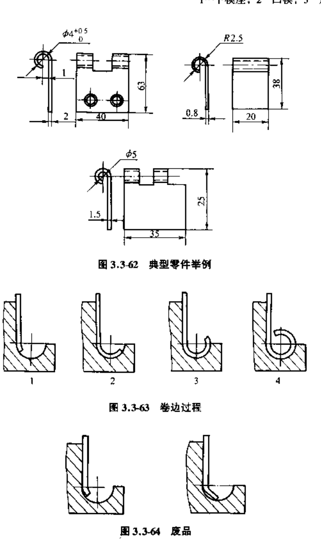


图 3.3-62 典型零件举例

图 3.3-63 卷边过程

图 3.3-64 废品

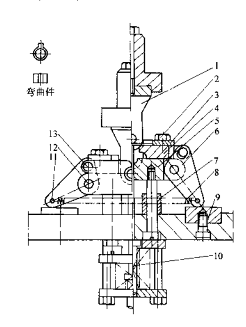


图 3.3-65 卷圆模

1—凸模；2—外六角螺钉；3—定位板；4、6—滑块；5—顶板；7—垫筒；8—弹簧；9—垫板；10—顶杆；11、12、13—轴销

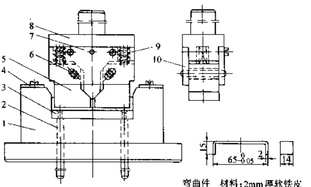


图 3.3-66 门形件弯形与校正模

1—凹模；2—顶杆；3—顶板；4—定位板；5—凸模；6—圆销；7—斜楔；8—上模座；9—弹簧；10—导板

图 3.3-68 所示为 C 形件弯模。

此模具供 C 形冲件弯曲用。

坯料放在顶件器 5 上，凹模 6 与顶件器 5 在同一水平面，坯料上的孔套在导正销 3 上，并以定位销 4 定位。冲压时，凹模 2 紧压坯料于顶件器 5 上，并一起下降，顶件器 5 台肩处平面下压凹模 6 的台肩面，使左、右凸模绕心轴往中间转动，把坯料紧压在凸、凹模之间使之成形。压力机滑块上升时，在弹簧作用下，顶销 10 把左、右凹模顶至原位，凸模 2 连同工件一起上升。顶件器 5 由弹顶器通过顶杆 8 退至原位。从凸模上取下冲件。

(10) 多角弯曲模

图 3.3-69 所示为多角弯曲模。

此模具利用摆动凹模同时弯曲工件两侧。

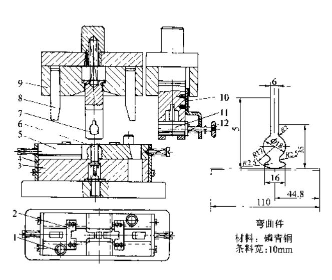


图 3.3-67 管夹弯模

1—限位柱；2—定位板；3—导滑板；4—挡板；5—滑块；6—顶板；7—联板；8—斜楔；9—固定板；10—挡板；11—心轴；12—手柄

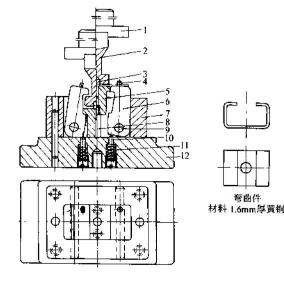


图 3.3-68 C形件弯模

1—模柄；2—凸模；3—导正销；4—定位销；5—顶件器；6—凹模；7—模框；8—顶杆；9—心轴；10—顶销；11—弹簧；12—下模座

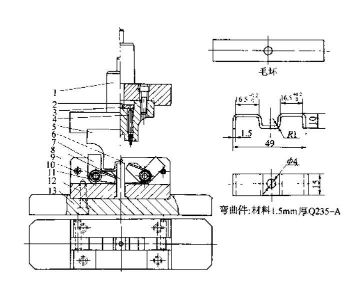


图 3.3-69 多角弯曲模

1—模柄；2—打棒；3—打板；4—顶杆；5、8—凸模；6—定位销；7—凹模；9—销；10—限位销；11—弹簧；12—凹模框；13—下模座

坯料放在凸模 8 及凹模 7 平面上，由定位销 6 定位。冲压时，凸模 5 下压坯料及凹模 7 下降，使左、右凹模 7 同时向中间转动，使坯料紧贴凸模弯曲成形。压力机滑块上升时，凹模 7 在弹簧 11 作用下转至原位。顶杆 4 把工件从凸模上顶下。

(11) 链环弯曲模

图 3.3-70 所示为链环弯曲模。

此模具为弯制链环用，一次冲程能完成整个工件的弯曲工作。

工作时，先把切割后的棒料放在芯子 7 上，由角铁 18 定位，然后调节螺杆连杆 14 的合适距离，连杆 14 分上下两段，由正反螺杆连成一体，可调节运动距离。压力机滑块下降时，由于连杆 14 的作用力，使支板 15 作旋转运动，滚轮 17 随之运动把棒料弯曲成形。当压力机滑块上升时，固定在模柄上的肋板 9 带动挡板 11，拨动杠杆 4，使弹簧 12 受力压缩，芯子 7 后退，进行卸料。当挡板 11 与杠杆 4 脱开时，芯子 7 在弹簧 12 的作用下，回到原来的位置，以便进行第二次弯曲。为使单个链环串联在一起，芯子 7 中间开有一槽子，见图 3.3-71 所示。在进行弯制第二环时，先把已弯制好的链环放在芯子 7 的槽中，然后把棒料放在芯子上，进行第二环弯曲。在弯曲过程中，棒料穿入第一环中，组成链环。这样重复之工作至所需链环数量。

为克服弯曲后链环的回跳变形，芯子 7 的中间部分制成凹形，如图 3.3-71。



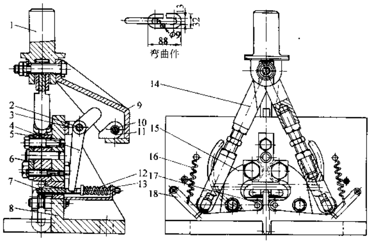


图 3.3-70 链环弯曲模

1—模柄；2—轴；3、13—支架；4—杠杆；5、15—支板；
6—盖板；7—芯子；8—底座；9—肋板；
10—轴；11—挡板；12、16—弹簧；14—连杆；17—滚轮；18—定位角铁

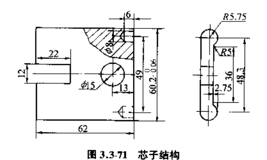


图 3.3-71 芯子结构

编写：华 林（武汉理工大学）
毛华杰（武汉理工大学）



第4章　拉　　深

1　拉深基本原理

拉深是利用具有一定圆角半径的模具，将冲裁或剪裁得到的平板毛坯制成各种形状的开口空心零件的冲压工序。

拉深时所用的模具与冲裁模不同，其凸模与凹模都没有锋利的刃口，而其工作部分都具有较大的圆角半径，并且凸、凹模之间的间隙一般大于板料厚度 t。

拉深工序可广泛应用于汽车、仪表、电子、航空和航天等各种工业部门和日常生活用品的生产中。拉深工序加工零件的尺寸范围可从直径几毫米至 2～3 m，厚度为 0.2～300 mm。用拉深工序可以制成筒形、锥形、球形、方盒形和其他不规则的薄壁零件，还可以与其他成形工序配合，制成形状极为复杂的零件。图 3.4-1 是部分拉深件的示意图。

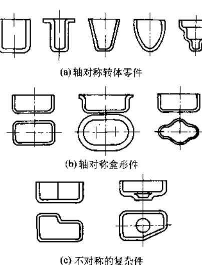


图 3.4-1　拉深件示意图

圆筒形拉深件是拉深中最简单、最具有代表性的一类零件，通过对圆筒形件拉深过程的分析，便可了解拉深的基本原理。

1.1　圆筒形件的拉深过程

一块圆形平板毛坯在拉深凸、凹模的作用下，逐步转化为圆筒形零件，其变形过程如图 3.4-2 所示。在平板毛坯上，沿着直径的方向画出一个局部的扇形区域 oab。凸模下降，迫使坯料拉入凹模，扇形 oab 转变为以下三个部分：

筒底部分——oef；

筒壁部分——$cdef$；

凸缘部分——$a'b'cd$。

凸模继续下降，筒底基本不动，凸缘部分的材料继续转变为筒壁，于是筒壁逐渐加高，凸缘逐渐缩小。由此可见，毛坯的变形主要集中在凹模表面的凸缘上，拉深过程就是使凸缘逐渐收缩，转化为筒壁的过程。

为了更进一步了解拉深过程中金属的流动状态，拉深前，在圆形毛坯上画出等间距 a 的同心圆和等分度的辐射线，如图 3.4-3 所示。由这些同心圆和辐射线所组成的网格，经拉深变形后，在筒形件底部的网格基本保持原来的形状，而在筒形件的筒壁部分，网格则发生了很大的变化。原来的同心圆变成了筒壁上的水平圆筒线，而且其间距 a 也增

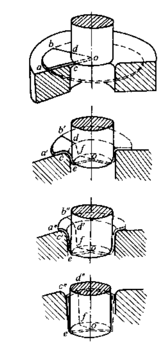


图 3.4-2　拉深变形过程示意图

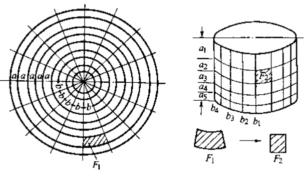


图 3.4-3　拉深件的网格变化

大了，愈靠近筒的上部增大愈多，即：

$$a_1 > a_2 > a_3 > \cdots > a$$

另外，原来等分度的辐射线变成了筒壁上的垂直平行线，其间距完全相等，即：

$$b_1 = b_2 = b_3 = \cdots \geqslant b$$

如果从平极毛坯上取一个扇形单元网格 F_1，在拉深后变成了矩形网格 F_2，若忽略板厚变化，则小单元体的面积不变，即：$F_1 = F_2$。

为什么原来的扇形单元体，拉深后却变成矩形了呢？这与一块扇形毛坯被拉着通过一个楔形槽（如图 3.4-4）的变化过程是类似的，坯料在直径方向被拉长的同时，切向则被压缩，使原来的扇形网格变成了矩形网格。

若将拉深件剖开，测量各部分厚度和硬度的变化可得到图 3.4-5 所示的拉深件沿高度方向硬度和厚度的变化。由图可知：圆筒形件的筒壁上部变厚，愈靠近筒口愈厚，筒底有稍许变薄，变薄最严重的部位出现在凸模圆角处。



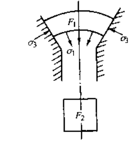


图 3.4-4 扇形小单元体的变形

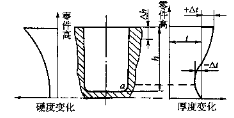


图 3.4-5 拉深件沿高度方向硬度和厚度的变化

由此可见，拉深是将凸缘部分的材料转化为筒壁的过程，也就是将凸缘区的扇形材料挤压成矩形，使材料向高度方向及厚度方向流动的过程。因此，拉深变形过程可以归结如下：

在拉深过程中，毛坯受凸模拉深力的作用，凸缘部分的材料径向产生拉应力 σ_1，切向产生压应力 σ_3。在拉应力 σ_1 和压应力 σ_3 的共同作用下，凸缘材料发生塑性变形，并不断被拉入凹模内形成筒形拉深件的过程。

如果圆板毛坯的直径为 D_0，拉深筒形件的平均直径为 d，通常以筒形件直径与毛坯直径的比值 m 表示拉深变形程度的大小，即：

$$m=\frac{d}{D_0} \tag{3.4-1}$$

m 称为拉深系数。显然，m 的数值愈小，拉深时，板料的变形程度愈大。

如果取同一种牌号的材料，在同一套模具上用逐渐加大毛坯直径的办法，改变拉深系数，进行拉深试验，试验结果如图 3.4-6 所示。当毛坯直径很小，拉深系数很大时，毛坯的变形程度很小，拉深过程中，凸缘能够顺利地转化为筒壁。但是，当毛坯直径加大，拉深系数减小到一定数值（例如 $m=0.75$）以后，毛坯凸缘出现皱折，产生了废品。如果增加压边装置，压住毛坯凸缘，防止起皱现象以后，再进一步加大毛坯直径，减小拉深系数，拉深过程又可以顺利进行。直到当毛坯直径加大、拉深系数减小到一定数值（例如 $m=0.5$）后时，才出现了筒壁拉断现象，拉深过程被迫中断。由此可见，凸缘起皱和筒壁拉断是筒形件拉深过程顺利进行的两大主要障碍。

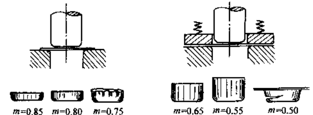


图 3.4-6 不同毛坯直径时拉深试验结果

如在上述试验过程中，同时还测出不同拉深系数下拉深力的变化，于是可得到如图 3.4-7 所示的一系列拉深力－行程曲线。分析这些曲线可以看到：拉深过程正常进行时，拉深力的变化规律基本一致，开始时逐渐增大，然后又逐渐减小，峰值的出现比较靠前。例外的情况有两种：当 $m=0.75$ 时，由于没有压边力，凸缘起皱，凸模迫使带皱的材料拉入凸凹模间隙之中，因此造成了拉深力的第二个峰值；当 $m=0.5$ 时，拉深力没有达到最高点，筒壁就被拉断了，拉深过程被迫中断。

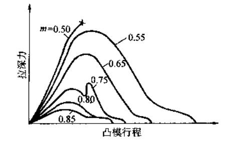


图 3.4-7 不同拉深系数时拉深力－行程曲线

根据以上初步分析，可归纳如下几点主要结论：

1）拉深时毛坯的变形主要集中在凸缘上。拉深过程就是使毛坯凸缘逐步收缩形成筒壁的过程。拉深时毛坯变形程度的大小可用拉深系数 $m=\frac{d}{D_0}$ 表示。

2）拉深力在拉深过程中的变化具有一定的规律性，开始逐渐增加然后逐渐减少，峰值的出现比较靠前。

3）影响拉深过程顺利进行的主要障碍有凸缘起皱和筒壁拉断。

1.2 拉深时毛坯的应力应变状态

以带压边圈的圆筒形件的拉深为例进行分析，根据圆筒形件拉深时各部位的受力和变形性质，可以分为以下五个区域，如图 3.4-8 所示。

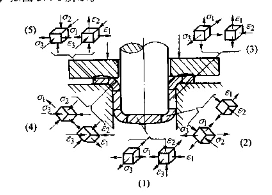


图 3.4-8 拉深过程中毛坯各部位的应力应变状态

1）筒底区。在拉深过程中，筒底将凸模的作用力传递给筒壁，起力的传递作用，筒底与凸模端面不完全接触，它相当于周边受均匀拉伸的圆板，受平面拉伸作用。由于凸模圆角与毛坯之间的摩擦阻力作用，因而在板厚方向的变形不大。筒底区上的 σ_1、σ_3 为拉应力，σ_2 为零，其上 ε_1、ε_3 为拉应变，ε_2 为压应变。

2）凸模圆角区。凸模圆角区是一个过渡区，材料承受筒壁的拉力、凸模压力和弯曲作用力。因而在圆角处的材料变薄最多，拉深时常在此处断裂。其上 σ_1、σ_3 为拉应力，σ_2 为压应力；其 ε_1 为拉应变，ε_2 为压应变，ε_3 为零。

3）筒壁区。该区是由凸缘材料转化而成的。它将凸模的作用力传给凸缘、所以是传力区。拉深中直径不变，切向



应变为零。若凸凹模间隙合理，在厚向没有作用力。其上 σ_1 为拉应力，σ_2 为零，中间应力 $\sigma_3 = 1/2\sigma_1$；其 ε_1 为拉应变，ε_2 为压应变，ε_3 为零。

4）凹模圆角区。该区材料除径向受拉，切向受压外，还受凹模圆角的压力和弯曲作用力。其上 σ_1 为拉应力，σ_3、σ_2 为压应力。其 ε_1 为拉应变，ε_3、ε_2 为压应变。

5）凸缘区。凸缘是拉深变形区，拉深时径向受拉伸长，切向受压缩短。其上 σ_1 为拉应力，σ_3、σ_2 为压应力。其 ε_1 为拉应变，ε_3 为压应变。厚度方向的应变 ε_2 取决于 σ_1 与 σ_3 的比值。拉深变形区内各点的 σ_1 与 σ_3 的比值是不同的，因而 ε_2 也是不同的。靠近变形区外缘较大的区域内，ε_2 为拉应变，靠近凹模圆角处 ε_2 为压应变。一般情况下，拉深件厚度变化的大致规律如图 3.4-5 所示。

1.3 凸缘变形区的应力分析

在拉深过程中，凸缘是主要变形区。凸缘上径向拉应力 σ_1 的大小，决定了拉深力的大小。凸缘上的压应力 σ_3 的大小与凸缘起皱有直接关系。因此，必须对凸缘变形区的应力进行分析。

设拉深过程的某一瞬时，凸缘半径为 R'，在任意半径 R 处取宽度为 dR，夹角为 φ 的弧形板条，其受力情况如图 3.4-9 所示。

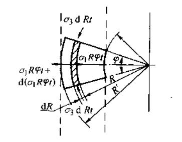


图 3.4-9 圆筒形件拉深时凸缘变形区的应力分析

根据平衡条件可知：

$$\sigma_1 R\varphi t + d(\sigma_1 R\varphi t) - \sigma_1 \varphi Rt + 2\sigma_3 \sin\frac{\varphi}{2} dR = 0 \tag{3.4-2}$$

因为 φ 角很小，所以有：

$$\sin\frac{\varphi}{2} \approx \frac{\varphi}{2}$$

代入式（3.4-2）并整理得：

$$R d\sigma_1 + (\sigma_1 + \sigma_3)\, dR = 0 \tag{3.4-3}$$

因为略去压边力和模具表面摩擦力，并且认为不存在剪应力，故可将径向、切向和板厚方向定为主应力方向。因而 σ_1 与 σ_3 分别表示径向和切向的主应力（板厚方向应力 $\sigma_2 = 0$）。

由塑性条件

$$\sigma_1 + \sigma_3 = \beta\sigma_s \tag{3.4-4}$$

取 $\beta = 1.1$，并将式（3.4-4）代入式（3.4-3）得：

$$R d\sigma_1 + 1.1\sigma_s dR = 0$$

即

$$d\sigma_1 = -1.1\sigma_s \frac{dR}{R}$$

积分上式得：

$$\sigma_1 = -1.1\int \sigma_s \frac{dR}{R}$$

式中 σ_s 为凸缘变形区材料的变形抗力。由于变形区不同部位变形程度不同以及材料的冷作硬化作用，使变形区各点材料的 σ_s 也不相同。为计算方便，取 $\sigma_s = \sigma_{sm}$ = 常数（σ_{sm} 为不同部位材料变形抗力的平均值），则：

$$\sigma_1 = -1.1\sigma_{sm}\int \frac{dR}{R}$$

积分上式得：

$$\sigma_1 = -1.1\sigma_{sm}\ln R + C \tag{3.4-5}$$

当 $R = R'$ 时，凸缘外边缘表面 $\sigma_1 = 0$。代入式（3.4-5）得

$$C = 1.1\sigma_{sm}\ln R'$$

将上式代入式（3.4-5）得径向拉应力

$$\sigma_1 = 1.1\sigma_{sm}\ln\frac{R'}{R} \tag{3.4-6}$$

利用式（3.4-4）和式（3.4-6），并认为 $\sigma_s = \sigma_{sm}$，则得切向压应力：

$$\sigma_3 = 1.1\sigma_{sm}\left(1 - \ln\frac{R'}{R}\right) \tag{3.4-7}$$

利用式（3.4-6）和式（3.4-7）可以求出拉深过程中某一瞬时作用在变形区上不同半径 R 处的径向拉应力 σ_1 和切向压应力 σ_3 的数值，并可绘出变形区径向拉应力 σ_1 和切向压应力 σ_3 的分布曲线，如图 3.4-10 所示。

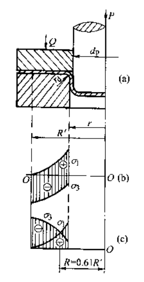


图 3.4-10 圆筒形件拉深时凸缘变形区的应力分布

令 $|\sigma_1| = |\sigma_3|$，代入式（3.4-6）和式（3.4-7），求得 σ_1 和 σ_3 两分布曲线的交点半径 $R = 0.61R'$，见图 3.4-10c。此半径把凸缘划分为两部分：左部压应力 σ_3 的绝对值最大，是压缩类变形，厚度变厚，且越靠近外缘增厚越大；$R = 0.61R'$ 处，材料既不增厚也不减薄；右部拉应力 σ_1 的绝对值最大，是伸长类变形，厚度减薄，且越靠近凹模口部减薄得越多。但压缩类变形区占整个凸缘绝大部分。所以总体来看，圆筒形件拉深属压缩类成形。另外，根据拉深时厚度的变化规律可知，压边圈仅与凸缘外周的局部面积接触，或压边圈施加于板料的压边力通常作用在靠近凸缘外周的环形区域，而并非作用于整个凸缘面上。

从图 3.4-10a、b 可以看出，在拉深每一瞬时，凸缘上沿径向各点的应力（σ_1 和 σ_3）是不同的。

σ_1 在凸缘内缘 $R = r$ 处最大：

$$\sigma_{1max} = 1.1\sigma_{sm}\ln\frac{R'}{r} \tag{3.4-6a}$$

σ_3 在凸缘外缘 $R = R'$ 处最大：

$$\sigma_{3max} = 1.1\sigma_{sm}\left(1 - \ln\frac{R'}{R'}\right) = 1.1\sigma_{sm} \tag{3.4-7a}$$

在整个拉深过程中，σ_{sm} 和 R' 是变化的，所以，σ_{1max} 和 σ_{3max} 也是变化的。

由式（3.4-6a）和（3.4-7a）可知：σ_{3max} 只与材料硬化有关，即随着拉深的进行，变形程度增加，σ_{sm} 增加，故 σ_{3max}



也增加。σ_{3max}的变化规律与材料硬化曲线变化相似。

σ_{1max}一方面随材料硬化而增加，另一方面随凸缘变形区 R'/r 减小而减小。研究表明，当拉深到 $R'=0.85R_0$ 时，σ_{1max}出现最大值 σ_{1max}^{max}。将 $R'=0.85R_0$ 代入式（3.4-6a）得

$$\sigma_{1max}^{max}=1.1\sigma_{sm}\ln\frac{0.85R_0}{r}=1.1\sigma_{sm}\ln\frac{0.85}{m} \qquad (3.4\text{-}8)$$

式中，R_0 为拉深前毛坯半径；r 为拉深后工件半径；m 为拉深系数。

1.4 拉深起皱及防皱措施

（1）起皱现象

如果在板条两端施加轴向压力 P，当压力 P 增加到某一临界值 P_c 时，板条就会产生弯曲隆起现象，如图 3.4-11 所示，这种现象称为受压失稳。理论和试验研究表明，板条抵抗受压失稳的能力与板条的相对厚度和板条的力学性能有关。板条愈长，厚度愈薄愈易失稳；材料的弹性模数 E、应变刚模数 D 愈大，抵抗失稳的能力也愈大。

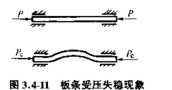


图 3.4-11 板条受压失稳现象

拉深时凸缘起皱与板条的受压失稳相似。凸缘是否发生起皱现象，不仅取决于凸缘变形区切向压应力的大小，而且取决于凸缘变形区抵抗失稳起皱的能力——凸缘变形区的相对厚度$\frac{t}{D_t-d}$与材料的机械性能。

拉深过程中，导致凸缘失稳起皱的切向压应力与凸缘抵抗失稳起皱的能力都是变化的。

随着拉深过程的不断进行，切向压应力不断增加。同时，凸缘变形区不断缩小，厚度增加，因而凸缘变形区的相对厚度$\frac{t}{D_t-d}$也不断增加。切向压应力的增加必将增加失稳起皱的趋势，相对厚度$\frac{t}{D_t-d}$的增加却有利于提高抵抗失稳起皱的能力。此外，随着拉深变形程度的增加，材料的应变刚模数 D 逐渐减小。D 的减小一方面降低了材料抵抗失稳起皱的能力，但另一方面却又减小了切向压应力增加的趋势。由于各因素互相消长的结果，在拉深的全过程中必有某一阶段，凸缘失稳起皱的趋势最为强烈。理论与试验研究表明：凸缘失稳起皱发生在凸缘宽度缩至一半左右，即：$R_t-r_0\approx\frac{1}{2}(R_0-r_0)$ 时，也即大约发生在拉深过程的中间阶段。

生产中用下列简单的公式作为判断拉深时凸缘不起皱的近似条件：

$$D_0-d\leqslant 22t \qquad (3.4\text{-}9)$$

将上式作简单的换算后可得：

$$\frac{t}{D_0}\times 100\geqslant 4.5(1-m) \qquad (3.4\text{-}10)$$

由式（3.4-10）可以看出：利用该式作为判断凸缘不起皱的近似条件，虽然撇开了材料力学性能的影响，但却反映了影响失稳起皱的两个重要因素（拉深系数和板料相对厚度）之间的关系。$\frac{t}{D_0}$愈大，不起皱的极限拉深系数可愈小。因此，上述近似条件也可作为确定是否采取防皱措施的依据。

工艺上常将压边圈下凸缘变形区的失稳起皱称为外皱，以区别于其他部位材料的失稳起皱——内皱。拉深筒形件时一般只有外皱现象。

（2）采用压边圈的条件

为了防止在拉深过程中，工件的侧壁或凸缘起皱，应使毛坯（或半成品）被拉入凹模之前，保持稳定状态，其稳定程度主要取决于毛坯的相对厚度 $t/D\times100$，或以后各次拉深半成品的相对厚度 $t/d_{n-1}\times100$。拉深时采用压边圈的条件，列于表 3.4-1。

表 3.4-1 拉深时采用压边圈的条件

拉深方法	第一次拉深		以后各次拉深	
	$t/D\times100$	m_1	$t/d_{n-1}\times100$	m_n
用压边圈	<1.5	<0.6	<1.0	<0.8
可用可不用	1.5~2.0	0.6	1.0~1.5	0.8
不用压边圈	>2.0	>0.6	>1.5	>0.8

（3）压边力计算

在实际生产中，为了防止外皱的产生，常常采用压边圈。压边圈施加的压边力 Q，对拉深工艺有很大的影响，当压边力 Q 过大时，坯料由于受到过大的压边力，而不容易被拉入凹模，导致底部转角处拉裂或严重变薄超差。当压边力 Q 过小时，则坯料在拉深过程中很容易起皱，影响拉深件质量。况且由于起皱的坯料拉入凸凹模间隙中，则会被卡住，既易损坏模具，又使工件底部被拉破，如图 3.4-12 所示。因此，压边力必须选择适中，不能过大过小。一般情况下，应选择在保证工件凸缘部分不起皱的最小压边力。

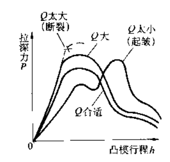


图 3.4-12 拉深力与压边力的关系

压边力的大小可按表 3.4-2 中的公式计算，表 3.4-2 中的单位压边力 q 值与材料的力学性能、材料厚度、拉深系数和润滑等条件有关，可通过试验确定，其值可查表 3.4-3。

表 3.4-2 计算压边力的公式

拉深情况	公 式
任何形状拉深件	$Q=Fq$
筒形件第一次拉深	$Q=\frac{\pi}{4}[D^2-(d_1+2r_d)^2]q$
筒形件以后各次拉深	$Q=\frac{\pi}{4}[d_{n-1}^2-(d_n+2r_d)^2]q$

注：F 为压边的面积，mm²；q 为单位压边力，N；$d_1\cdots d_n$ 为拉深件直径，mm；r_d 为凹模圆角半径，mm。

由于在整个拉深过程中，凸缘失稳起皱的趋势不同，合理的压边力应当也是变化的。在拉深的开始阶段，失稳起皱的趋势渐增，压边力也应该逐渐增大，此后，失稳起皱的趋势减弱，压边力也相应递减。图 3.4-13 所示的试验曲线为维持凸缘不致失稳起皱时，所需的最小压边力 Q_{min} 在拉深全过程中的变化规律。生产实际中要想提供这样变化的压边力是相当困难的。

表 3.4-3　单位压边力 q

材料名称		单位压边力 q/MPa
铝		0.8～1.2
紫铜、硬铝（已退火的）		1.2～1.8
黄铜		1.5～2.0
软钢	$t<0.5$	2.5～3.0
	$t>0.5$	2.0～2.5
镀锡钢板		2.5～3.0
耐热钢（软化状态）		2.8～3.5
高合金钢、高锰钢、不锈钢		3.0～4.5

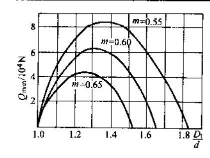


图 3.4-13　在拉深过程中所需最小压边力的试验曲线

（4）常用的压边装置

生产中实际使用的压边装置有以下两类。

1）弹性压边装置。这种装置多用于普通冲床，常用的有：橡皮压边装置（见图 3.4-14a）、弹簧压边装置（见图 3.4-14b）和气垫式压边装置（见图 3.4-14c）等。

弹性压边装置的压边力 Q 与拉深行程的关系如图 3.4-15 所示。由图可知：弹性压边装置中，除了气垫式压边装置可以在拉深过程中使压边力基本保持不变外，其他两类压边装置所提供的压边力在整个拉深过程中反而都是不断增加的。因此，这类压边装置只能用于浅拉深。

2）刚性压边装置。刚性压边装置的压边力 Q 不随拉深行程而变化，拉深效果较好，适用于深拉深，且模具结构简单，但这种结构多用于双动冲床，即：凸模装在压力机的内滑块上，压边装置装在外滑块上，如图 3.4-16 所示。

（5）压边圈的结构形式

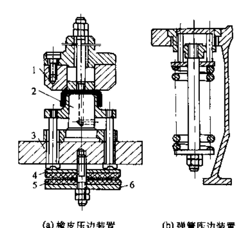
在一般拉深模中均采用如图 3.4-17a 所示的平面压边圈。对于拉深薄的板料且具有小凸缘的拉深件时，应采用带凸边的压边圈，如图 3.4-17b 所示。对于拉深薄的板料或拉深宽凸缘零件，为了增加防皱效果，生产中采用锥而形状压边圈，如图 3.4-17c 所示。

锥而压边圈所以能增加防皱效果，是因为压边圈随着双动压力机外滑块的下行，先使毛坯的凸缘部分变成锥形，并将其压紧在凹模锥面上。随着凸模继续下行完成拉深工作。锥面压边圈使毛坯外径产生一定的收缩，相当于完成了一次拉深工序，从而降低了拉深变形的难度。这种锥面形状的压边圈，其防皱效果的大小，决定于 α 角的大小，α 越小其作用效果越显著。但对厚度很薄的零件成形，其效果并不明显。

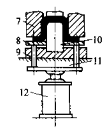
（6）防止拉深件起皱的措施

1）采用压边圈。防止起皱的基本措施，是在拉深模上采用压边圈，给毛坯施加适当的压力，使毛坯在凹模和压边圈之间的间隙中流动，以限制毛坯的起皱。

压边力的大小应当适当，既要有足够的压边力防止凸缘起皱，而又不能过大，以免引起较大的摩擦力，而增大拉深载荷，导致危险断面的拉裂。压边力的大小，在理论上应随毛坯起皱的规律变化，根据研究，在毛坯外径减小至 $0.85R_0$ 时，毛坯起皱最大，此时压边力也应最大，但实际上很难实现。



(a) 橡皮压边装置　　(b) 弹簧压边装置



(c) 气垫式压边装置

图 3.4-14　弹性压边装置

1—凹模；2—凸模；3—下模板；4—上托板；5—橡皮；6—下托板；7—凹模；8—压边圈；9—下模座；10—凸模；11—压力机工作台；12—气缸

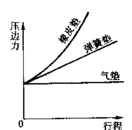


图 3.4-15　弹性压边力 Q 与拉深行程的关系

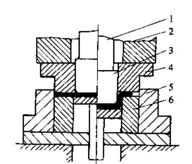
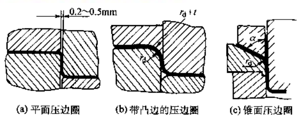


图 3.4-16　双动冲床用刚性压边装置

1—内滑块；2—外滑块；3—拉深凸模；4—落料凸模兼压边圈；5—落料凹模；6—拉深凹模

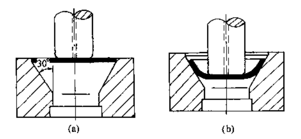
2）采用锥形凹模。锥形凹模使毛坯进入凸、凹模间隙之前，就使毛坯发生一定的收缩，而增加了抗失稳能力，减小了起皱的趋向，如图 3.4-18 所示。





(a) 平面压边圈　(b) 带凸边的压边圈　(c) 锥面压边圈

图 3.4-17　压边圈的结构形式



(a)　(b)

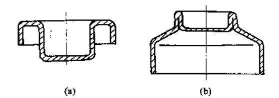
图 3.4-18　锥形拉深凹模

果用锥形凹模，还可以降低凹模圆角半径造成的摩擦阻力和弯曲变形阻力。凹模锥面对毛坯的作用力，也有利于切向压缩变形，因而拉深系数也可较平面凹模小，有利于拉深成形。锥形凹模的锥角，一般取30°为宜。

3）采用反拉深。反拉深是将制成的空心件毛坯反扣在凹模上，凸模从毛坯底部下压，毛坯的内表面变成外表面。由于凸模拉深方向与上一道工序相反，故称反拉深。

由于毛坯反扣在凹模上，使毛坯与凹模之间摩擦力比正拉深大，同时还增加了弯曲力。因而使变形区的径向拉应力增加较大，从而有利于防止工件起皱。由于毛坯外缘在进入凹模口部时，弯曲力及摩擦力明显减小，故直径大厚度薄的拉深件，也要用压边圈。反拉深只能用于第二次拉深及以后各次拉深。反拉深的特点见本章7.1节。

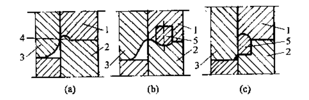
反拉深除防止拉深件起皱外，还可以加工用正拉深难以加工的零件，如图3.4-19所示。此外，反拉深不仅可减少工序数目，还可提高表面质量。



(a)　(b)

图 3.4-19　反拉深典型件

4）采用拉深肋或拉深槛。采用拉深肋或拉深槛是以提高径向拉应力的办法来防止起皱，如图3.4-20所示。



(a)　(b)　(c)

图 3.4-20　带拉深肋的拉深模

1—压边圈；2—凹模；3—凸模；4—拉深肋；5—拉深槛

1.5　拉断与极限拉深系数

（1）拉深件危险断面

拉深过程中，由于毛坯所处部位、变形性质与变形经历的不同，拉深件的壁厚分布也是不均匀的，如图3.4-5所示。一般而言，变薄最严重的地方发生在筒壁与凸模圆角相切的部位。拉深过程中的拉断现象即首先发生在这个最为薄弱的环节，因此，此处称为危险断面。危险断面之所以发生在筒壁与凸模圆角相切处是因为凸模圆角对材料产生摩擦效应的结果。凸模圆角对材料的摩擦有助于抵抗材料的变薄。但是，由于凸凹模间隙的存在，愈靠近凸模圆角的上方，材料与凸模之间的贴合愈不紧密，得到的凸模有利摩擦效应就愈少。而在筒壁与凸模圆角相切处，材料与凸模脱离接触，因此就成为变薄最严重的部位，即危险断面。

根据以上分析可知：拉深时发生拉断的位置是在危险断面。发生拉断危险的时刻是在拉深过程的起始阶段且最大拉应力出现之前。如果拉深件在最大拉深力已经出现之后还没有拉断，拉深过程即可进行到底。因此，保证拉深顺利进行的必要条件是：筒壁传力区的最大拉应力 σ_{max} 应当小于危险断面的抗拉强度 σ_p。

（2）拉深成形极限

圆筒形件拉深的主要质量问题是凸缘区受压产生失稳起皱和筒壁与凸模圆角相切处受拉破裂。由于起皱可用压边圈或其他工艺措施防止，因而圆筒形件拉深的成形极限主要受破裂的影响。

圆筒形件拉深的成形极限一般用极限拉深系数 m_{min} 表示，即在拉深过程中不产生起皱和破裂时所允许的最小拉深系数，或零件底部圆角处不被拉破时允许的最大毛坯直径。

（3）影响极限拉深系数的因素

1）材料的力学性能

① 厚向异性指数 r。厚向异性指数 r 是指板料宽度方向与厚度方向应变的比值。r 值愈大，说明板料在拉深过程中其厚度方向不易变薄也不易增厚，危险断面也不易变薄或拉断，因而极限拉深系数可以减小。

② 硬化指数 n。硬化指数 n 是指板料产生均匀变形的能力。n 值愈大，愈不容易出现拉伸细颈，因而危险断面的严重变薄和拉断现象也可相应推迟，因此其极限拉深系数可以减小。

③ 屈强比 σ_s/σ_b。屈服极限 σ_s 小的材料容易产生塑性变形，使得凸缘变形区的变形抗力减小；而提高材料的抗拉强度，则提高了危险断面处的强度，减少了破裂的危险。因此，屈强比 σ_s/σ_b 小的材料，其极限拉深系数可以减小。

④ 材料的延伸率 δ 和 ψ。塑性好的材料，其极限拉深系数可以减小。

2）模具的几何参数。影响极限拉深系数的模具的几何参数主要有：凸、凹模圆角半径及凸、凹模之间的间隙。

① 凸模圆角半径 r_p。如果 r_p 太小，使板料绕凸模弯曲的拉应力增加，降低危险断面的强度。但是，r_p 太大，又会减少传递拉深力的承载面积，同时还会减少凸模端面与板料的接触面积，增加板料的悬空部分，容易产生内皱。一般将凸模圆角半径选为 $r_p=(4\sim6)\ t$ 比较合理。

② 凹模圆角半径 r_d。如果 r_d 太小，使板料在拉深过程中的弯曲阻力增加，从而增加了筒壁传力区的最大拉应力，不利于极限拉深系数的降低。但是，r_d 太大，又会减少有效压边面积，容易使板料失稳起皱。一般将凹模圆角半径选为 $r_d=(6\sim8)\ t$ 比较合理。

③ 凸凹模之间的间隙 Z。板料在拉深过程中有增厚的现象。间隙的大小，应当有利于板料的塑性流动，不致使板料受到太大的挤压作用与摩擦阻力而使拉深力增加。但间隙太大又会影响拉深件的准确度。一般取 $Z=(1.25\sim1.30)\ t$ 比较合理。

3）板料的相对厚度 t/D_0。板料的相对厚度愈大，拉深

时抵抗失稳起皱的能力愈大。因而，可以减小压边力，减小摩擦损耗，有利于极限拉深系数的降低。

4）摩擦与润滑条件。从减少板料在拉深过程中的摩擦损耗，减小筒壁传力区的负担来看，凹模与压边圈的工作表面应比较光滑，并且必须采用润滑剂。从增加危险断面的强度，减小危险断面的负担来看，在不影响拉深件表面质量的条件下，凸模工作表面可以作得比较粗糙，而且在拉深时不应在凸模与板料的接触表面涂润滑剂。

2 拉深件的工艺性

拉深件的工艺性好坏，直接影响到该零件能否用拉深方法生产出来，影响到零件的质量、成本和生产周期等。一个工艺性好的拉深件，不仅能满足产品的使用要求，同时也能用最简单、最经济和最快的方法生产出来。

对拉深件的工艺性要求如下。

（1）对拉深件的外形尺寸要求

设计拉深件时，应尽量减小拉深件的高度，使其可能用一次或两次拉深工序来完成。对于各种形状的拉深件，用一次工序可以拉成的条件为：

1）对于圆筒形件一次拉成的条件为：拉深的高度 $h \leqslant (0.5 \sim 0.7)\ d$（式中，$d$ 为拉深件直径，按厚度中心计算）。

对于不同材料一次拉深所允许的极限高度见表 3.4-4。

表 3.4-4 一次拉深所允许的极限高度 mm

材料名称	铝	硬铝	黄铜	软钢
相对拉深高度 h/d	0.73 ~ 0.75	0.60 ~ 0.65	0.75 ~ 0.80	0.68 ~ 0.72

2）对于矩形件一次拉成的条件为：当矩形件角部的圆角半径 $r = (0.05 \sim 0.20)\ B$（式中，B 为矩形件的短边宽度），拉深件高度 $h \leqslant (0.3 \sim 0.8)\ B$。

3）对于凸缘件一次拉成的条件为：零件的圆筒形部分直径与毛坯直径的比值 $d/D \geqslant 0.4$。

（2）对拉深件的形状要求

1）在设计拉深件时，应明确注明必须保证的是外形还是内形，不能同时标注内外尺寸。

2）尽量避免采用非常复杂的和非对称的拉深件。对半敞开的或非对称的空心件，应能组合成对进行拉深，拉深后将其切成两个或多个零件，如图 3.4-21 所示。

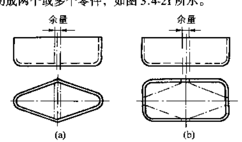


图 3.4-21 组合成对进行拉深

3）拉深复杂外形的空心件时，要考虑工序间毛坯定位的工艺基准。

4）在凸缘面上有下凹的拉深件（如图 3.4-22），如下凹的轴线与拉深方向一致，可以拉出。若下凹的轴线与拉深方向垂直，则只能在最后校正时压出。

（3）对拉深件圆角半径的要求

1）筒形件的圆角半径：如图 3.4-23 所示，底与壁部的圆角半径应满足 $r_p \geqslant t$，凸缘与壁之间的圆角半径应满足 $r_d \geqslant 2t$。否则，应增加整形工序。从有利于变形角度来看，最好取 $r_p \approx (3 \sim 5)\ t$，$r_d \approx (4 \sim 8)\ t$。

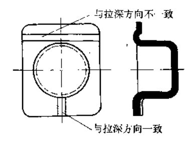


图 3.4-22 凸缘面上带下凹的拉深件

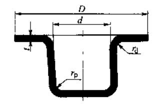


图 3.4-23 圆筒形拉深件

2）矩形件角部的圆角半径 $r \geqslant 3t$，如图 3.4-24 所示。为了减少拉深次数，应尽量取 $r \geqslant 1/5H$（H 为矩形件的高度）。

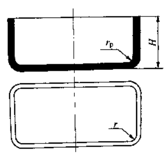


图 3.4-24 矩形拉深件

（4）对拉深件尺寸公差等级及表面质量的要求

1）拉深件断面尺寸的公差等级一般都在 IT11 以下。如果公差等级要求高，可采取整形来达到尺寸的要求。

2）拉深件的厚度变化（不变薄拉深）为：上下壁厚为 $(1.2 \sim 0.6)\ t$。矩形盒四角也要增厚。

3）多次拉深的零件外壁上或带凸缘拉深件的凸缘表面，应允许有拉深过程中所产生的印痕。

（5）拉深件上的孔位要合理布置

1）拉深件上的孔位应设置在与主要结构面（凸缘面）同一平面上，或使孔壁垂直于该平面，以便冲孔与修边同时在一道工序中完成。如图 3.4-25 所示为拉深件上孔位的比较。

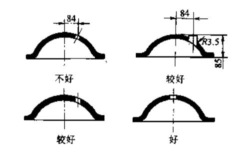
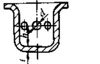
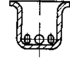


图 3.4-25 拉深件上孔位的比较

2）拉深件侧壁上的冲孔，只有当孔与底边或凸缘边的距离 $h > 2d + t$ 时才有可能（如图 3.4-26a），否则，这孔只有钻出（如图 3.4-26b）。



(a) $h>2d+t$



(b) $h<2d+t$

图 3.4-26　拉深件侧壁上的冲孔

3）如图 3.4-27 所示，拉深件凸缘上的孔距应为：$D_t \geqslant d_1+3t+2r_2+d$，拉深件底部孔径应为：$d \leqslant d_1-2r_1-t$。

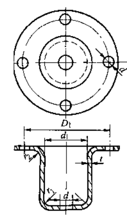


图 3.4-27　拉深件上孔位的合理设计

3　圆筒形件的拉深工序计算

3.1　修边余量的确定

拉深时，由于材料力学性能具有方向性、凸凹模之间的间隙不均、板厚变化和定位不准等原因，拉深后的零件口部或凸缘周边不齐，通常都需要进行修边。所以，在计算毛坯尺寸之前，应按加上修边余量后的零件尺寸进行展开计算。

修边余量的数值，根据生产实践经验，对于无凸缘圆筒形拉深件和有凸缘圆筒形拉深件的修边余量 δ 可分别查表 3.4-5 和表 3.4-6。

3.2　毛坯尺寸计算

（1）简单旋转体拉深件的毛坯直径

由于拉深后工件的平均厚度与毛坯厚度差别不大，厚度变化可以忽略不计，所以拉深件毛坯尺寸的确定可按照毛坯表面积与拉深件表面积（加修边余量后）相等的原则计算。

毛坯直径按下式确定：

$$D=\sqrt{\frac{4}{\pi}A_0}=\sqrt{\frac{4}{\pi}\Sigma A} \tag{3.4-11}$$

式中，A_0 为拉深件的表面积；A 为拉深件分解成简单几何形状的表面积。

在计算中，拉深件的直径按厚度中线计算。但当板厚 $t<1$ mm 时，也可按拉深件的外径和内高（或按内径和外高）计算。

表 3.4-5　无凸缘圆筒形拉深件的修边余量　mm

拉深件高度 h	拉深件的相对高度 h/d				附　图
	>0.5~0.8	>0.8~1.6	>1.6~2.5	>2.5~4.0	
≤10	1.0	1.2	1.5	2.0	
>10~20	1.2	1.6	2.0	2.5	
>20~50	2.0	2.5	3.3	4.0	
>50~100	3.0	3.8	5.0	6.0	
>100~150	4.0	5.0	6.5	8.0	
>150~200	5.0	6.3	8.0	10.0	
>200~250	6.0	7.5	9.0	11.0	
>250	7.0	8.5	10.0	12.0	

表 3.4-6　带凸缘圆筒形拉深件的修边余量　mm

凸缘直径 d_t	凸缘的相对直径 d_t/d				附　图
	<1.5	>1.5~2.0	>2.0~2.5	>2.5	
≤25	1.8	1.6	1.4	1.2	
>25~50	2.5	2.0	1.8	1.6	
>50~100	3.5	3.0	2.5	2.2	
>100~150	4.3	3.6	3.0	2.5	
>150~200	5.0	4.2	3.5	2.7	
>200~250	5.5	4.6	3.8	2.8	
>250	6.0	5.0	4.0	3.0	

如图 3.4-28 所示为圆筒形拉深件的毛坯直径计算，可先按该零件分解成三个简单几何形状，并按表 3.4-7 所列公式求得 A_1、A_2、A_3，然后再按式（3.4-11）求出。

对于常用的拉深件，可选用表 3.4-8 所列公式直接求得其毛坯直径 D。

如果某些拉深件筒口或凸缘边沿不要求十分平齐，则工件在拉深后可不进行修边。但由于表 3.4-7、表 3.4-8 的计算公式都没有考虑到实际上材料在拉深后厚度发生变化的自然特征，因此，为了比较准确地求得毛坯直径，以满足工件不

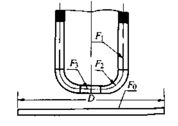


图 3.4-28　圆筒形拉深件的毛坯直径计算图

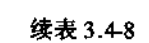
表 3.4-7　简单几何形状的表面积 A 的计算公式

图　示	计算公式	图　示	计算公式
	$\frac{\pi D^2}{4}=0.7854D^2$		$\pi(ds-2hr)$
	$\frac{\pi}{4}(d_2^2-d_1^2)$ $=0.7854(d_2^2-d_1^2)$		$\pi(ds+2hr)$
	$\pi d_1 h$		$2\pi rh=6.28rh$
	$\pi s\left(\frac{d_1+d_2}{2}\right)$ $s=\sqrt{h^2+c^2}$		$2\pi rh=6.28rh$
	$2\pi r^2=6.28r^2$		$\pi^2 rd=9.87rd$
	$2\pi rh=6.28rh$		$2\pi Gs=2\pi^2 Gr=19.74Gr$
	$\pi\left(\frac{d}{h}+h^2\right)$		$2\pi Gs=2\pi^2 Gr$ $=19.74Gr$
	$\pi^2 rd=9.87rd$		$2\pi Gs=\pi^2 Gr$ $=9.87Gr$
	$\frac{\pi^2 rd}{2}-2\pi r^2$ $=4.94rd-6.28r^2$		$\pi^2 rd=9.87rd$
	$\frac{\pi^2 rd}{2}+2\pi r^2$ $=4.94rd+6.28r^2$		$17.7rd$



表 3.4-8 常用旋转体拉深件毛坯直径的计算公式

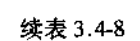
序号	零件形状	毛坯直径 D
1		$\sqrt{d^2+4dh}$
2		$\sqrt{d_2^2+4d_1h}$
3		$\sqrt{2dl}$
4		$\sqrt{2d(l+2h)}$
5		$\sqrt{d_3^2+4(d_1h_1+d_2h_2)}$
6		$\sqrt{d_2^2+4(d_1h_1+d_2h_2)+2l(d_2+d_3)}$
7		$\sqrt{d_1^2+2l(d_1+d_2)+4d_2h}$
8		$\sqrt{d_1^2+2l(d_1+d_2)}$


续表 3.4-8

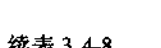
序号	零件形状	毛坯直径 D
9		$\sqrt{d_1^2+2l(d_1+d_2)+d_3^2-d_2^2}$
10		$\sqrt{d_2^2+4(d_1h_1+d_2h_2)}$
11		$\sqrt{d_1^2+4d_1h+2l(d_1+d_2)}$
12		$\sqrt{d_1^2+2r(\pi d_1+4r)}$
13		$\sqrt{d_1^2+6.28rd_1+8r^2+d_3^2-d_2^2}$
14		$\sqrt{d_1^2+4d_2h_1+6.28rd_1+8r^2}$ 或 $\sqrt{d_2^2+4d_2h-1.72rd_2-0.56r^2}$
15		$\sqrt{d_1^2+2\pi rd_1+8r^2+4d_2h+d_3^2-d_2^2}$
16		$\sqrt{d_1^2+2\pi rd_1+8r^2+2l(d_2+d_3)}$

续表 3.4-8

序号	零件形状	毛坯直径 D
17		当 $r_1 \neq r$ 时 $\sqrt{d_1^2+6.28rd_1+8r^2+4d_2h+6.28r_1d_2+4.56r_1^2}$ 当 $r_1=r$ 时 $\sqrt{d_1^2+4d_2h+2\pi r(d_1+d_2)+4\pi r^2}$
18		$\sqrt{d_1^2+2\pi rd_1+8r^2+4d_2h+2l(d_2+d_3)}$
19		$\sqrt{d_1^2+2\pi r(d_1+d_2)+4\pi r^2}$
20		当 $r \neq r_1$ 时 $\sqrt{d_1^2+6.28rd_1+8r^2+4d_2h_1+6.28r_1d_2+4.56r_1^2+d_4^2-d_3^2}$ 当 $r=r_1$ 时 $\sqrt{d_4^2+4d_2h-3.44rd_2}$
21		$\sqrt{8Rh}$ 或 $\sqrt{S^2+4h^2}$
22		$\sqrt{d_2^2+4h^2}$
23		$\sqrt{2d^2}=1.414d$
24		$\sqrt{d_1^2+d_2^2}$


续表 3.4-8

序号	零件形状	毛坯直径 D
25		$1.414\sqrt{d_1^2+2d_1h+l(d_1+d_2)}$
26		$\sqrt{d_1^2+4\left[h_1^2+d_1h_2+\frac{l}{2}(d_1+d_2)\right]}$
27		$\sqrt{d^2+4(h_1^2+dh_2)}$
28		$\sqrt{d_2^2+4(h_1^2+d_1h_2)}$
29		$\sqrt{d_1^2+4h^2+2l(d_1+d_2)}$
30		$1.414\sqrt{d_1^2+l(d_1+d_2)}$
31		$1.414\sqrt{d^2+2dh_1}$ 或 $2\sqrt{dh}$
32		$\sqrt{d_1^2+d_2^2+4d_1h}$



续表 3.4-8

序号	零件形状	毛坯直径 D
33		$\sqrt{d_2^2-d_1^2+4d_1\left(h+\frac{l}{2}\right)}$
34		$\sqrt{8R\left[x-b\left(\arcsin\frac{x}{R}\right)\right]+4dh_2+8rh}$
35		$\sqrt{d_1^2+4d_1h_1+4d_2h_2}$

注：1. 尺寸按工件材料厚度中心层尺寸计算。

2. 对于厚度小于 1 mm 的拉深件，可不按工件材料厚度中心层尺寸计算，而根据工件外壁尺寸计算。

3. 对于部分未考虑工件圆角半径的计算公式，在计算有圆角半径的工件时计算结果要偏大，故此情形下，可不考虑或少考虑修边余量。

修边的要求，对于不进行修边的拉深件的毛坯直径计算，应考虑材料厚度变薄的因素，其计算公式如下：

$$D=1.13\sqrt{A\alpha}=1.13\sqrt{\frac{A}{\beta}} \tag{3.4-12}$$

式中，D 为毛坯直径，mm；A 为不加修边余量的拉深件表面积，mm^2；α 为平均变薄系数，见表 3.4-9；β 为面积改变系数，见表 3.4-9。

（2）形状复杂的旋转体拉深件的毛坯直径

表 3.4-9　用压边圈拉深时的材料变薄系数及面积改变系数

相对圆角半径 $R_0=\frac{r_d+r_p}{t}$	相对间隙 $c_0=\frac{D_d+d_p}{2t}$	单位压边力 p/MPa	拉深速度 $v/m\cdot s^{-1}$	平均变薄系数 $\alpha=\frac{t_1}{t}$	面积改变系数 $\beta=\frac{A_1}{A}$
>3	>1.1	1.0~2.0	<0.2	1.0~0.97	1.00~1.03
3~2	1.1~1.0	2.0~2.5	0.2~0.4	0.97~0.93	1.03~1.08
<2	<1.0~0.98	2.5~3.0	>0.4	0.93~0.90	1.08~1.11

形状复杂的旋转体拉深件的毛坯直径的计算可利用形心法（久里金法则），即任何形状的母线 AB 绕轴线 YY 旋转，所得到的旋转体面积等于母线长度 L 与其重心绕轴线旋转所得周长 $2\pi X$ 的乘积（X 是该段母线重心至轴线的距离），如图 3.4-29 所示。

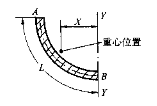


图 3.4-29　旋转体母线

即：旋转体面积　$A=2\pi LX$

毛坯面积　$A_0=\frac{\pi D^2}{4}$　（D—毛坯直径）

$$A=A_0$$

故毛坯直径：

$$D=\sqrt{8LX}=\sqrt{8\left(l_1x_1+l_2x_2+\cdots+l_nx_n\right)}=\sqrt{8\sum lx} \tag{3.4-13}$$

求毛坯直径的方法有三种。

1）解析法。此法适用于直线和圆弧相连接的形状，如图 3.4-30 所示。

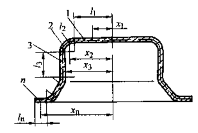


图 3.4-30　由直线和圆弧连接的母线

对于母线为直线和圆弧连接的旋转体拉深件，可将其母线分成简单（直线和圆弧）的线段 1、2、3…n，算出各线段的长度（圆弧长度可从表 3.4-10 和表 3.4-11 查得）l_1、l_2、l_3…l_n，再算出各线段的重心至轴线的距离（圆弧的重心至轴线的距离可从表 3.4-12 和表 3.4-13 查得）x_1、x_2、x_3…x_n，然后按式（3.4-13）计算（或从表 3.4-14 查得）毛坯直径 D。

表 3.4-10　中心角 $\alpha = 90°$时的弧长 L　　mm

$$L = \frac{\pi}{2} R$$

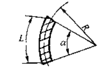
例：$R = 41.25$　查弧长 L

R	L
41	64.40
0.2	0.31
0.05	0.08
41.25	64.79

R	L	R	L	R	L	R	L
		10	15.71	40	62.83	70	109.96
0.01	0.02	11	17.28	41	64.40	71	111.53
0.02	0.03	12	18.85	42	65.97	72	113.10
0.03	0.05	13	20.42	43	67.54	73	114.67
0.04	0.06	14	21.99	44	69.12	74	116.24
0.05	0.08	15	23.56	45	70.69	75	117.81
0.06	0.09	16	25.13	46	72.26	76	119.38
0.07	0.11	17	26.70	47	73.83	77	120.95
0.08	0.12	18	28.27	48	75.40	78	122.52
0.09	0.14	19	29.85	49	76.97	79	124.09
		20	31.42	50	78.54	80	125.66
0.1	0.16	21	32.99	51	80.11	81	127.23
0.2	0.31	22	34.56	52	81.68	82	128.81
0.3	0.47	23	36.13	53	83.25	83	130.38
0.4	0.63	24	37.70	54	84.82	84	131.95
0.5	0.79	25	39.27	55	86.39	85	133.52
0.6	0.94	26	40.84	56	87.96	86	135.09
0.7	1.10	27	42.41	57	89.54	87	136.66
0.8	1.26	28	43.98	58	91.11	88	138.23
0.9	1.41	29	45.55	59	92.68	89	139.80
		30	47.12	60	94.25	90	141.37
1	1.57	31	48.69	61	95.82	91	142.94
2	3.14	32	50.27	62	97.39	92	144.51
3	4.71	33	51.84	63	98.96	93	146.08
4	6.28	34	53.41	64	100.53	94	147.66
5	7.85	35	54.98	65	102.10	95	149.23
6	9.42	36	56.55	66	103.67	96	150.80
7	11.00	37	58.12	67	105.24	97	152.37
8	12.57	38	59.69	68	106.81	98	153.94
9	14.14	39	61.26	69	108.39	99	155.51



表 3.4-11 中心角 $\alpha<90°$时的弧长 L_1（$R=1$） mm



$$L=\pi R\frac{\alpha}{180°}=L_1R$$

例：$\alpha=25°30'$ $R=22.5$ 求弧长 L

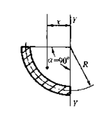
$L=(0.436+0.009)\times22.5=10.01$

α/(°)						α/(′)			
α	L_1	α	L_1	α	L_1	α	L_1	α	L_1
		30	0.524	60	1.047			30	0.009
1	0.017	31	0.541	61	1.064	1	—	31	0.009
2	0.035	32	0.558	62	1.082	2	—	32	0.009
3	0.052	33	0.576	63	1.099	3	0.001	33	0.010
4	0.070	34	0.593	64	1.117	4	0.001	34	0.010
5	0.087	35	0.611	65	1.134	5	0.001	35	0.010
6	0.105	36	0.628	66	1.152	6	0.002	36	0.011
7	0.122	37	0.646	67	1.169	7	0.002	37	0.011
8	0.140	38	0.663	68	1.187	8	0.002	38	0.011
9	0.157	39	0.681	69	1.204	9	0.002	39	0.011
10	0.175	40	0.698	70	1.222	10	0.003	40	0.012
11	0.192	41	0.715	71	1.239	11	0.003	41	0.012
12	0.209	42	0.733	72	1.256	12	0.003	42	0.012
13	0.227	43	0.750	73	1.274	13	0.004	43	0.013
14	0.244	44	0.768	74	1.291	14	0.004	44	0.013
15	0.262	45	0.785	75	1.309	15	0.004	45	0.013
16	0.279	46	0.803	76	1.326	16	0.005	46	0.014
17	0.297	47	0.820	77	1.344	17	0.005	47	0.014
18	0.314	48	0.838	78	1.361	18	0.005	48	0.014
19	0.332	49	0.855	79	1.379	19	0.005	49	0.014
20	0.349	50	0.873	80	1.396	20	0.006	50	0.015
21	0.366	51	0.890	81	1.413	21	0.006	51	0.015
22	0.384	52	0.907	82	1.431	22	0.006	52	0.015
23	0.401	53	0.925	83	1.448	23	0.007	53	0.016
24	0.419	54	0.942	84	1.466	24	0.007	54	0.016
25	0.436	55	0.960	85	1.483	25	0.007	55	0.016
26	0.454	56	0.977	86	1.501	26	0.008	56	0.017
27	0.471	57	0.995	87	1.518	27	0.008	57	0.017
28	0.489	58	1.012	88	1.536	28	0.008	58	0.017
29	0.506	59	1.030	89	1.553	29	0.008	59	0.017



表 3.4-12 中心角 $\alpha=90°$时弧的重心到 $Y—Y$ 轴的距离 x


mm



$$x=\frac{2}{\pi}R$$

例：$R=52.37$ 求 x

R	x
52	33.12
0.3	0.19
0.07	0.05
52.37	33.36

$\alpha=90°$，$R<100$ 时弧的重心到 $Y—Y$ 轴的距离

R	x	R	x	R	x	R	x
		10	6.37	40	25.48	70	44.58
0.01	0.01	11	7.01	41	26.11	71	45.22
0.02	0.01	12	7.64	42	26.75	72	45.86
0.03	0.02	13	8.28	43	27.39	73	46.49
0.04	0.03	14	8.92	44	28.02	74	47.13
0.05	0.03	15	9.55	45	28.66	75	47.77
0.06	0.04	16	10.19	46	29.30	76	48.41
0.07	0.05	17	10.83	47	29.93	77	49.05
0.08	0.05	18	11.46	48	30.57	78	49.69
0.09	0.06	19	12.10	49	31.21	79	50.32
		20	12.74	50	31.84	80	50.95
0.1	0.06	21	13.37	51	32.48	81	51.59
0.2	0.13	22	14.01	52	33.12	82	52.23
0.3	0.19	23	14.65	53	33.76	83	52.86
0.4	0.25	24	15.29	54	34.39	84	53.50
0.5	0.32	25	15.92	55	35.03	85	54.13
0.6	0.38	26	16.56	56	35.67	86	54.77
0.7	0.45	27	17.20	57	36.30	87	55.41
0.8	0.51	28	17.83	58	36.94	88	56.05
0.9	0.57	29	18.47	59	37.58	89	56.68
		30	19.11	60	38.21	90	57.33
1	0.64	31	19.74	61	38.85	91	57.96
2	1.27	32	20.38	62	39.49	92	58.59
3	1.91	33	21.02	63	40.12	93	59.23
4	2.55	34	21.65	64	40.76	94	59.87
5	3.18	35	22.29	65	41.40	95	60.51
6	3.82	36	22.93	66	42.04	96	61.15
7	4.46	37	23.57	67	42.67	97	61.79
8	5.10	38	24.20	68	43.31	98	62.43
9	5.73	39	24.84	69	43.95	99	63.06

表 3.4-13　中心角 $\alpha<90°$ 时弧的重心到 $Y—Y$ 轴的距离 x　　mm

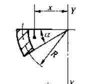
$$x=R\frac{180°\sin\alpha}{\pi\alpha}=Rx_0$$

式中　x_0 为 $R=1$ 时的 x 值（可查表）

例：$R=20$，$\alpha=25°$时

求 x

$$x=Rx_0=20\times0.969=19.38$$



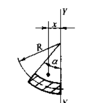
$$x=R\frac{180°(1-\cos\alpha)}{\pi\alpha}=Rx_0$$

式中　x_0 为 $R=1$ 时的 x 值（可查表）

例：$R=25$，$\alpha=38°$时

求 x

$$x=Rx_0=25\times0.320=8$$



$R=1$ 时弧的重心到 $Y—Y$ 轴的距离 x_0（$x_0=\frac{180°\sin\alpha}{\pi\alpha}$）

α/(°)	x_0	α/(°)	x_0	α/(°)	x_0
		30	0.955	60	0.827
1	1.000	31	0.952	61	0.822
2	1.000	32	0.949	62	0.816
3	1.000	33	0.946	63	0.810
4	0.999	34	0.942	64	0.805
5	0.999	35	0.939	65	0.799
6	0.998	36	0.936	66	0.793
7	0.998	37	0.932	67	0.787
8	0.997	38	0.929	68	0.781
9	0.996	39	0.925	69	0.775
10	0.996	40	0.921	70	0.769
11	0.994	41	0.917	71	0.763
12	0.993	42	0.913	72	0.757
13	0.992	43	0.909	73	0.750
14	0.990	44	0.905	74	0.744
15	0.989	45	0.901	75	0.738
16	0.987	46	0.896	76	0.731
17	0.985	47	0.891	77	0.725
18	0.984	48	0.887	78	0.719
19	0.982	49	0.883	79	0.712
20	0.980	50	0.879	80	0.705
21	0.978	51	0.873	81	0.699
22	0.976	52	0.868	82	0.692
23	0.974	53	0.864	83	0.685
24	0.972	54	0.858	84	0.678
25	0.969	55	0.853	85	0.671
26	0.966	56	0.848	86	0.665
27	0.963	57	0.843	87	0.658
28	0.960	58	0.838	88	0.651
29	0.958	59	0.832	89	0.644

$R=1$ 时弧的重心到 $Y—Y$ 轴的距离 x_0（$x_0=\frac{180°(1-\cos\alpha)}{\pi\alpha}$）

α/(°)	x_0	α/(°)	x_0	α/(°)	x_0
		30	0.256	60	0.478
1	0.009	31	0.264	61	0.484
2	0.017	32	0.272	62	0.490
3	0.026	33	0.280	63	0.497
4	0.035	34	0.288	64	0.503
5	0.043	35	0.296	65	0.509
6	0.052	36	0.304	66	0.515
7	0.061	37	0.312	67	0.521
8	0.070	38	0.320	68	0.527
9	0.073	39	0.327	69	0.533
10	0.087	40	0.335	70	0.538
11	0.095	41	0.343	71	0.544
12	0.104	42	0.350	72	0.550
13	0.113	43	0.358	73	0.555
14	0.122	44	0.366	74	0.561
15	0.130	45	0.373	75	0.566
16	0.139	46	0.380	76	0.572
17	0.147	47	0.388	77	0.577
18	0.156	48	0.395	78	0.582
19	0.164	49	0.402	79	0.587
20	0.173	50	0.409	80	0.592
21	0.181	51	0.416	81	0.597
22	0.190	52	0.423	82	0.602
23	0.198	53	0.430	83	0.606
24	0.206	54	0.437	84	0.611
25	0.215	55	0.444	85	0.615
26	0.223	56	0.451	86	0.620
27	0.231	57	0.458	87	0.624
28	0.240	58	0.464	88	0.628
29	0.248	59	0.471	89	0.633



表 3.4-14　根据 *LX* 查毛坯直径 *D*（$D=\sqrt{8LX}$）　mm

D	LX	D	LX	D	LX	D	LX
20	50	76	722	132	2 178	188	4 418
21	55	77	741	133	2 211	189	4 465
22	60.5	78	760.5	134	2 244	190	4 512
23	66	79	780	135	2 278	191	4 560
24	72	80	800	136	2 312	192	4 608
25	78	81	820	137	2 346	193	4 656
26	84.5	82	840.5	138	2 380	194	4 704
27	91	83	861	139	2 415	195	4 753
28	98	84	882	140	2 450	196	4 802
29	105	85	903	141	2 485	197	4 851
30	112.5	86	924.5	142	2 520	198	4 900
31	120	87	946	143	2 556	199	4 950
32	128	88	968	144	2 592	200	5 000
33	136	89	990	145	2 628	201	5 050
34	144.5	90	1 012.5	146	2 664	202	5 100
35	154	91	1 035	147	2 701	203	5 151
36	162	92	1 058	148	2 738	204	5 202
37	171	93	1 081	149	2 775	205	5 253
38	180.5	94	1 104.5	150	2 812	206	5 304
39	190	95	1 128	151	2 850	207	5 356
40	200	96	1 152	152	2 888	208	5 408
41	210	97	1 176	153	2 926	209	5 460
42	220.5	98	1 200	154	2 964	210	5 512
43	231	99	1 225	155	3 003	211	5 565
44	242	100	1 250	156	3 042	212	5 618
45	253	101	1 275	157	3 081	213	5 671
46	264.5	102	1 300	158	3 120	214	5 724
47	276	103	1 326	159	3 161	215	5 778
48	285.5	104	1 352	160	3 200	216	5 832
49	300	105	1 378	161	3 240	217	5 886
50	312.5	106	1 404	162	3 280	218	5 940
51	325	107	1 431	163	3 321	219	5 995
52	338	108	1 458	164	3 362	220	6 050
53	351	109	1 485	165	3 403	221	6 105
54	364.5	110	1 512	166	3 444	222	6 166
55	378	111	1 540	167	3 486	223	6 216
56	392	112	1 568	168	3 528	224	6 272
57	406	113	1 596	169	3 570	225	6 328
58	420.5	114	1 624	170	3 612	226	6 384
59	435	115	1 653	171	3 655	227	6 441
60	450	116	1 682	172	3 698	228	6 485
61	465	117	1 711	173	3 741	229	6 555
62	480.5	118	1 740	174	3 784	230	6 612
63	496	119	1 770	175	3 828	231	6 670
64	512	120	1 800	176	3 872	232	6 715
65	528	121	1 830	177	3 916	233	6 786
66	544	122	1 860	178	3 960	234	6 844
67	561	123	1 891	179	4 005	235	6 903
68	578	124	1 922	180	4 050	236	6 962
69	595	125	1 953	181	4 095	237	7 021
70	612.5	126	1 984	182	4 140	238	7 080
71	630	127	2 016	183	4 186	239	7 140
72	648	128	2 048	184	4 232	240	7 200
73	666	129	2 080	185	4 278	241	7 260
74	684.5	130	2 112	186	4 324	242	7 320
75	703	131	2 145	187	4 371	243	7 381

续表 3.4-14

D	LX	D	LX	D	LX	D	LX
244	7 442	278	9 660	360	16 200	530	35 112
245	7 503	279	9 730	365	16 653	535	35 778
246	7 564	280	9 800	370	17 112	540	36 450
247	7 626	281	9 870	375	17 578	545	37 128
248	7 688	282	9 940	380	18 050	550	37 812
249	7 750	283	10 011	385	18 528	555	38 503
250	7 812	284	10 082	390	19 012	560	39 200
251	7 875	285	10 153	395	19 503	565	39 903
252	7 938	286	10 224	400	20 000	570	40 612
253	8 001	287	10 296	405	20 503	575	41 328
254	8 064	288	10 368	410	21 012	580	42 050
255	8 128	289	10 440	415	21 528	585	42 778
256	8 192	290	10 512	420	22 050	590	43 512
257	8 256	291	10 585	425	22 578	595	44 253
258	8 320	292	10 658	430	23 112	600	45 000
259	8 385	293	10 731	435	23 653	605	45 753
260	8 450	294	10 804	440	24 200	610	46 512
261	8 515	295	10 878	445	24 753	615	47 278
262	8 580	296	10 952	450	25 312	620	48 050
263	8 646	297	11 026	455	25 878	625	48 828
264	8 712	298	11 100	460	26 450	630	49 612
265	8 778	299	11 175	465	27 028	635	50 403
266	8 844	300	11 250	470	27 612	640	51 200
267	8 911	305	11 628	475	28 203	645	52 003
268	8 978	310	12 012	480	28 800	650	52 812
269	9 045	315	12 403	485	29 403	655	53 628
270	9 112	320	12 800	490	30 012	660	54 450
271	9 180	325	13 203	495	30 628	665	55 278
272	9 248	330	13 612	500	31 250	670	56 112
273	9 316	335	14 028	505	31 878	675	56 953
274	9 384	340	14 450	510	32 512	680	57 800
275	9 453	345	14 878	515	33 153	685	58 653
276	9 522	350	15 312	520	33 800	690	59 512
277	9 591	355	15 753	525	34 453	695	60 378

例：试计算图 3.4-31 所示旋转体拉深件（料厚 $t=1$ mm）的毛坯直径。

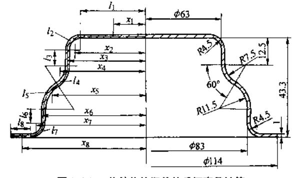


图 3.4-31 旋转体拉深件的毛坯直径计算

解：首先查表 3.4-10 和表 3.4-11 得出直线和圆弧的长度 l_1、l_2、$l_3 \cdots l_8$

$l_1=\dfrac{63-9}{2}$ mm $=27$ mm　$l_2=7.85$ mm　$l_3=12.5$ mm -4.5 mm $=8$ mm

$l_4=8\times1.047$ mm $=8.376$ mm　$l_5=12\times1.047$ mm $=12.564$ mm

$l_6=(43.3-12.5-8\sin60^\circ-12\sin60^\circ-5.5)$ mm $=8$ mm

$l_7=7.85$ mm　$l_8=\dfrac{114-83-2-9}{2}$ mm $=10$ mm

再由表 3.4-12 和表 3.4-13 算出直线重心和圆弧重心至轴线的距离得：

$x_1=\dfrac{27}{2}=13.5$ mm　$x_2=27$ mm $+3.18$ mm $=30.18$ mm

$x_3=\dfrac{63+1}{2}=32$ mm　$x_4=(32+8-8\times0.827)$ mm $=33.384$ mm

$x_5=\dfrac{83-23}{2}$ mm $+12\times0.827$ mm $=39.924$ mm　$x_6=\dfrac{83+1}{2}$ mm $=42$ mm

$x_7=(42+5-3.18)$ mm $=43.82$ mm　$x_8=\dfrac{83+2+9}{2}+\dfrac{10}{2}$ mm $=52$ mm

将计算结果代入式（3.4-13），或查表 3.4-14，即可求得毛坯直径 D：

$$D=\sqrt{8\sum lx}=\sqrt{8\times2\,838.63}\text{ mm}=150.7\text{ mm}$$

2）作图解析法。此法适用于曲线连接的形状，如图 3.4-32 所示。

对于母线为曲线连接的旋转体拉深件，可将拉深件的母线分成线段 1、2、3…n，把各线段近似当作直线看待，从图上量出各线段长度 l_1、l_2、$l_3 \cdots l_n$ 及其重心至轴线的距离

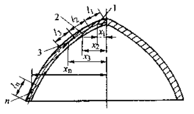


图 3.4-32 母线为圆滑曲线的拉深件

x_1、x_2、$x_3 \cdots x_n$，然后按式（3.4-13）计算出毛坯直径 D：

$$D = \sqrt{8\sum lx}$$

为了计算方便，若把各线段长度 l_1、l_2、$l_3 \cdots l_n$ 取成相等，即：$l_1 = l_2 = l_3 = \cdots = l_n = l$，则

$$D = \sqrt{8l(x_1 + x_2 + \cdots + x_n)} \qquad (3.4\text{-}14)$$

例：试计算如图 3.4-33 所示旋转体拉深件（料厚 t = 0.7 mm）的毛坯直径。

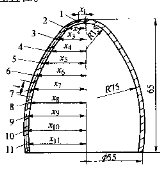


图 3.4-33 作图解析法求毛坯直径

解：从图上量出 $l = 7$ mm，将母线刚好分成 11 等分，量出各线段重心至轴线的距离：$x_1 = 3.5$ mm　$x_2 = 9.8$ mm　$x_3 = 13.8$ mm　$x_4 = 17.2$ mm　$x_5 = 20.5$ mm　$x_6 = 23$ mm　$x_7 = 25$ mm　$x_8 = 26.5$ mm　$x_9 = 27$ mm　$x_{10} = 27.1$ mm　$x_{11} = 27.1$ mm

然后按式（3.4-14）计算出毛坯直径 D：

$$D = \sqrt{8\times7(3.5+9.8+13.8+17.2+20.5+23+25+26.5+27+27.1+27.1)}\text{mm}$$

$$= \sqrt{8\times1\ 543.5} = 111\ \text{mm}$$

或查表 3.4-14 得出。

3）作图法。应用此法时，一定要严格按比例作图，否则误差很大。

作图法的步骤如图 3.4-34 所示。先将拉深件的母线分成线段 1、2、3…8，通过各线段的重心作轴线的平行线，再作一根平行于轴线的直线 AB，在直线 AB 上依次量取各线段长度 l_1、l_2、$l_3 \cdots l_8$，自任意点 O 作射线 1、2、3…9，然后依次作直线 1′、2′、3′…9′与各射线平行，1′与 9′的交点

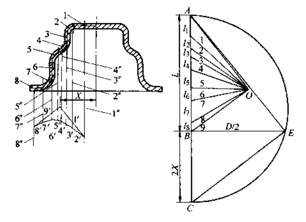


图 3.4-34 求毛坯尺寸的作图法

就是拉深件母线的重心位置。

由于：　　$D = \sqrt{8LX}$

则：　　$D^2 = 8LX \quad \left(\dfrac{D}{2}\right)^2 = L\times 2X \qquad (3.4\text{-}15)$

上式相当于一个直角三角形的定理，即直角三角形的顶点至弦的垂线乃是弦两段的比例中项，根据这个定理可以用作图方法求出毛坯半径 $D/2$。

将直线 AB 延长至 C，使 $BC = 2X$，以 AC 为直径作半圆，然后在 B 点作 AC 的垂线 BE，则 BE 的长度就是毛坯半径 $D/2$（见图 3.4-34）。

3.3 拉深系数和拉深次数

（1）拉深系数和影响拉深系数的因素

在制定拉深工艺和设计拉深模具时，必须预先确定该零件是用一道工序拉成还是用多道工序拉成。在决定拉深工序的次数时，必须做到使毛坯内部的应力既不超过材料的强度极限，而且还能充分利用材料的塑性。也就是说每一道拉深工序，应在毛坯侧壁强度允许的条件下，采用最大可能的变形程度。

为了计算拉深次数，在生产实际中应用了“拉深系数”这一概念。所谓拉深系数，即每次拉深后圆筒形件的直径与拉深前毛坯（或半成品）直径的比值，以 m 表示，即：

第一次拉深的拉深系数　$m_1 = \dfrac{d_1}{D}$

第二次拉深的拉深系数　$m_2 = \dfrac{d_2}{d_1}$

第三次拉深的拉深系数　$m_3 = \dfrac{d_3}{d_2}$

……

第 n 次拉深的拉深系数　$m_n = \dfrac{d_n}{d_{n-1}}$

式中，D 为毛坯直径；d_1、d_2、d_3、…、d_n 为各次半成品（或工件）的直径（见图 3.4-35）。

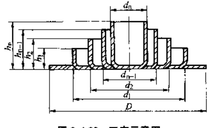


图 3.4-35 工序示意图

拉深系数是拉深工序中重要的工艺参数。因为在工艺计算中，只要知道每道工序的拉深系数值，就可以计算出各道工序的工件尺寸。

拉深系数可用来表示拉深过程的变形程度，拉深系数愈小，说明拉深前后直径差别愈大，也即该道工序的变形程度愈大。由上式可知，拉深系数 m 值是永远小于 1 的。

在制定拉深工艺时，如拉深系数 m 取得过小，就会使拉深件起皱、断裂或严重变薄超差。因此，拉深系数 m 的减小有一个客观的界限，这个界限就称为极限拉深系数。

目前，在生产实际中采用的各种材料的极限拉深系数见表 3.4-15 ~ 表 3.4-18。

影响拉深系数的主要因素如下。

1）材料的供应状态。一般用于拉深的材料为软化状态，即一般材料为退火状态，而奥氏体型不锈钢和高温合金为淬火状态。对于硬化剧烈的材料，必须增加工序间的热处理以恢复塑性，才能进行下一道的拉深。



表 3.4-15 圆筒形件带压边圈时的极限拉深系数

拉深系数	毛坯相对厚度 $t/D\times100$					
	2.0~1.5	1.5~1.0	1.0~0.6	0.6~0.3	0.3~0.15	0.15~0.08
m_1	0.48~0.50	0.50~0.53	0.53~0.55	0.55~0.58	0.58~0.60	0.60~0.63
m_2	0.73~0.75	0.75~0.76	0.76~0.78	0.78~0.79	0.79~0.80	0.80~0.82
m_3	0.76~0.78	0.78~0.79	0.79~0.80	0.80~0.81	0.81~0.82	0.82~0.84
m_4	0.78~0.80	0.80~0.81	0.81~0.82	0.82~0.83	0.83~0.85	0.85~0.86
m_5	0.80~0.82	0.82~0.84	0.84~0.85	0.85~0.86	0.86~0.87	0.87~0.88

注：1. 表中的拉深系数适用于08、10和15Mn等低碳钢及软化的H62黄铜。对拉深性能较差的材料，如：20，25号钢及A2，A3和硬铝等，应将表中值增大1.5%~2.0%；而对塑性更好的材料，如：05及08钢、10A号深冲钢和软铝等，可将表中值减小1.5%~2.0%。

2. 表中值适用于未经中间退火的拉深，若采用中间退火工序时，可将表中值减小2%~3%。

3. 表中较小值适用于大的凹模圆角半径 $[r_d=(8\sim15)t]$；较大值适用于小的凹模圆角半径 $[r_d=(4\sim8)t]$。

表 3.4-16 圆筒形件不带压边圈时的极限拉深系数

毛坯相对厚度 $t/D\times100$	各次拉深系数					
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6
0.4	0.90	0.92	—	—	—	—
0.6	0.85	0.90	—	—	—	—
0.8	0.80	0.88	—	—	—	—
1.0	0.75	0.85	0.90	—	—	—
1.5	0.65	0.80	0.84	0.87	0.90	—
2.0	0.60	0.75	0.80	0.84	0.87	0.90
2.5	0.55	0.75	0.80	0.84	0.87	0.90
3.0	0.53	0.75	0.80	0.84	0.87	0.90
3以上	0.50	0.70	0.75	0.78	0.82	0.85

注：此表适用于08、10及15Mn等材料。

表 3.4-17 不锈钢及高温合金的首次拉深系数

材 料	试验值 m_1	推荐值 m_1
奥氏体型	0.46~0.50	0.53~0.59
铁素体型	—	0.57~0.65

低碳钢（如：08钢）及纯铝，当内部晶粒过大（钢1~4级；纯铝，大于0.035 mm）时，虽然塑性很好，但变形（拉深）后，表面会出现橘皮状组织，有时还会导致局部断裂。

材料的组织要均匀，方向性要小，以减少拉深件口部凸耳的产生。

表 3.4-18 不锈钢及高温合金的以后各次拉深系数

材料	热处理	$m_1=0.53$		$m_1=0.56$		$m_1=0.63$		$m_1=0.72$	
		试验值 m_n	推荐值 m_n	试验值 m_n	推荐值 m_n	试验值 m_n	推荐值 m_n	试验值 m_n	推荐值 m_n
奥氏体型	无中间热处理	0.75~0.83	0.86~0.91	0.72~0.80	0.83~0.88	0.70~0.76	0.80~0.83	0.67~0.72	0.76~0.81
	有中间热处理	0.70~0.74	0.78~0.81	0.67~0.72	0.76~0.80	0.63~0.69	0.72~0.75	0.62~0.65	0.69~0.72
铁素体型	无中间热处理	—	—	—	—	0.74~0.80	0.84~0.87	0.72~0.77	0.80~0.84
	有中间热处理	—	—	0.71~0.74	0.80~0.83	0.67~0.73	0.77~0.80	0.65~0.69	0.74~0.76

2）材料的力学性能。材料的塑性好（即 δ，Ψ 大），屈强比小（即 σ_s/σ_b 小），则拉深系数 m 可小一点，对于拉深件，一般选用含碳量较低的05、08和10号拉深钢板或塑性好的铝、铜等有色金属。

大量试验研究表明，材料的厚向异性指数 r，对材料的极限拉深系数影响较大。

由理论推导可知：决定拉深成形极限的是凸模圆角附近毛坯危险断面处的承载能力 P_k 与凸缘变形区阻力 P。这两个力与 r 值之间的关系如式（3.4-16）和式（3.4-17）所示。

$$P_k=A\left(\frac{1+r}{\sqrt{1+2r}}\right)^{1+n} \tag{3.4-16}$$

$$P=B\sqrt{\frac{(1+r)^{1+n}}{[r\ (1+c)^2+1+c^2]^{1-n}}} \tag{3.4-17}$$

式中，A、B 为常数；n 为材料的硬化指数，详见图3.4-36，按平均值计算；c 为凸模直径与凸缘变形区宽度之比，表示拉深进行的程度。

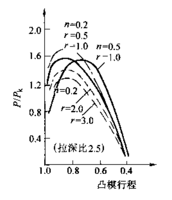


图 3.4-36 n 值和 r 值对拉深力—行程曲线的影响

当凸缘变形区阻力为最大时，设 $c=c'$，于是得比值

$$D'=\frac{P_k}{P}=K\sqrt{\frac{(1+r)^{1+n}[r(1+c')^2+1+c'^2]^{1-n}}{(1+2r)^{1+n}}} \tag{3.4-18}$$

利用 D'值可以衡量不同材料的拉深性能，如材料的硬化指数 n 为已知（一般 $n<1$，通常为 $n\approx0\sim0.5$），则 r 值愈大时，D'值也愈大，材料的拉深性能也就愈好。这可以从图 3.4-36 中看出，随着 r 值的增大，相对拉深力（拉深力 P 与拉深件危险断面处的抗拉强度 P_k 的比值）下降，就容易成形。从最大拉深力的行程位置来看，$D'=P_k/P=1/P/P_k$，即 D'是随看 r 的增大面增大的，即 r 值增大，极限拉深系数减小。

前面提到的是材料的厚向异性指数。但是，r 值对拉深性能的影响也受材料的面内各向异性类型的影响。如对于不同组织的金属材料，r 值即使相同，但其面内各向异性程度也大不相同，在 45°方向 r_{45} 值最大的材料，其拉深性能不好。

硬化指数 n 对极限拉深系数的影响较小。

3）材料的相对厚度 t/D。材料的相对厚度是拉深系数 m 的一个重要影响因素。t/D 愈大，m 可以减小，对拉深愈有利。因为相对厚度愈大，抵抗凸缘失稳起皱的能力提高。

4）拉深道次。首次拉深后，材料将产生加工硬化，塑性降低。因此，第一次拉深时，m 值最小，以后各道依次增加。只有当工序间增加了退火工序，才可再取较小的拉深系数。

5）拉深方式。采用压边圈时，因不易起皱，m 可取小一些。不用压边圈时，m 要取大一些。

6）模具几何参数。凸模圆角半径较大时，m 值可取小一点。但凸模圆角半径过小时，易使危险断面变薄严重导致破裂。凹模圆角半径较大时，则 m 值可以小一点。因为拉深时，圆角处的弯曲力较小材料容易流入模腔。但凹模圆角半径过大时，毛坯过早地脱离压边圈的作用而产生起皱。

7）润滑条件。模具表面光滑，润滑良好，可以改善材料的流动，有助于降低极限拉深系数。

（2）拉深次数

通常拉深系数有两个不同的概念：一是拉深件成形所要求的拉深系数，其数值为零件直径与毛坯直径之比值；另一个是材料力学性能及拉深条件所允许的极限拉深系数，它是由试验来确定的，其数值已列入表 3.4-15 至表 3.4-18 中。

在制定拉深工艺时应比较零件要求的拉深系数的数值与材料允许的极限拉深系数的数值。如零件要求的拉深系数值大于材料允许的极限拉深系数的值时，零件可一次拉深成形，否则就需要多次拉深。

拉深次数可用下述三种方法确定。

1）计算法。拉深次数由所采用的拉深系数按式（3.4-19）确定：

$$n=1+\frac{\lg d-\lg(m_1D)}{\lg m} \tag{3.4-19}$$

式中，n 为所需的拉深次数；m_1 为首次拉深系数；m 为第二次以后各次拉深的平均拉深系数；D 为毛坯直径；d 为拉深件直径。

由上式所计算的拉深次数通常都带小数，但一定要进位成较大的整数。

拉深次数确定后，就应分配各次拉深时所采用的拉深系数。分配时应满足下述条件：

① 应满足工件尺寸要求，使

$$d=(m_1m_2\cdots m_n)D$$

② 应保证每次拉深的变形程度小于极限值，因此 m_1、$m_2\cdots m_n$ 各值都应大于表 3.4-15 至表 3.4-18 所列数值。

③ 应符合拉深系数逐渐递增的原则，即 $m_1<m_2<\cdots<m_n$。

2）推算法。首先由表中查出各次拉深的极限拉深系数 m_1、$m_2\cdots m_n$。然后根据极限拉深系数，从第一道工序开始，依次求出各道工序的半成品直径，即：

$$d_1=m_1D$$
$$d_2=m_2d_1$$
$$\cdots$$
$$d_n=m_nd_{n-1}$$

采用此法一直推算到所得出的直径应小于或等于零件直径为止。

采用这种方法不仅可得到拉深次数，同时也可得到各中间工序的半成品直径尺寸。

3）查表法。无凸缘圆筒形件的拉深次数，也可根据零件的相对高度 h/d 及材料的相对厚度 $t/D\times100$，由表 3.4-19 查出。

表 3.4-19 无凸缘圆筒形件拉深次数的确定

拉深次数 \ 相对高度 h/d	毛坯相对厚度 $t/D\times100$					
	2～1.5	1.5～1.0	1.0～0.6	0.6～0.3	0.3～0.15	0.15～0.06
1	0.94～0.77	0.84～0.65	0.70～0.57	0.62～0.5	0.52～0.45	0.46～0.38
2	1.88～1.54	1.60～1.32	1.36～1.1	1.13～0.94	0.96～0.83	0.9～0.7
3	3.5～2.7	2.8～2.2	2.3～1.8	1.9～1.5	1.6～1.3	1.3～1.1
4	5.6～4.3	4.3～3.5	3.6～2.9	2.9～2.4	2.4～2.0	2.0～1.5
5	8.9～6.6	6.6～5.1	5.2～4.1	4.1～3.3	3.3～2.7	2.7～2.0

注：本表适用于 08、10 等软钢。

采用查表法比较简单，尤其是当只得到零件外形尺寸及材料的相对厚度时，其优点更为明显。

在选取拉深系数时要非常慎重，拉深系数过大，拉深次数增多，使生产成本提高；拉深系数过小，有可能起皱、变薄，甚至拉裂，导致不能保证产品的质量。

工序次数和各道工序半成品直径确定后，便应确定零件底部圆角半径（即拉深凸模的圆角半径），最后，可根据筒形件不同的底部形状，按表 3.4-20 所列公式计算出各道工序的拉深高度。

表 3.4-20 圆筒形拉深件的拉深高度计算公式

工件形状	拉深工序	计算公式
平底筒形件	1	$h_1=0.25\ (Dk_1-d_1)$
	2	$h_2=h_1k_2+0.25\ (d_1k_2-d_2)$
圆角底筒形件	1	$h_1=0.25\ (Dk_1-d_1)\ +0.43\frac{r_1}{d_1}\ (d_1+0.32r_1)$
	2	$h_2=0.25\ (Dk_1k_2-d_2)\ +0.43\frac{r_2}{d_2}\ (d_2+0.32r_2)$ 当 $r_1=r_2=r$ 时： $h_2=h_1k_2+0.25\ (d_1-d_2)\ -0.43\frac{r}{d_2}\ (d_1-d_2)$
圆锥底筒形件	1	$h_1=0.25\ (Dk_1-d_1)\ +0.57\frac{a_1}{d_1}\ (d_1+0.86a_1)$
	2	$h_2=0.25\ (Dk_1k_2-d_2)\ +0.57\frac{a_2}{d_2}\ (d_2+0.86a_2)$ 当 $a_1=a_2=a$，$d_1\neq d_2$ 时： $h_2=h_1k_1+0.25\ (d_1k_2-d_2)\ -0.57\frac{a}{d_2}$
球面底筒形件	1	$h_1=0.25Dk_1$
	2	$h_2=0.25Dk_1k_2=h_1k_2$

注：D—毛坯直径，mm；d_1、d_2—第 1、2 道工序拉深的工件直径，mm；
k_1、k_2—第 1、2 道工序拉深的拉深比（拉深比为拉深系数 m 的倒数）；r_1、r_2—第 1、2 道工序拉深件底部圆角半径，mm；
h_1、h_2—第 1、2 道工序拉深的高度，mm。

现举例说明无凸缘圆筒形拉深件的工序计算步骤。

例：试确定图 3.4-37 所示筒形件拉深时所需的毛坯直径、拉深次数及各道工序半成品尺寸（材料：08 钢）。

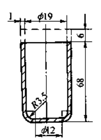


图 3.4-37 筒形件

计算步骤如下。

1）确定修边余量：查表 3.4-5，$\frac{h}{d}=\frac{68}{20}=3.4$，取 $\delta=$ 6 mm

2）计算毛坯直径：查表 3.4-8

$$D=\sqrt{d_1^2+4d_2h+6.28rd_1+8r^2}$$

$$=\sqrt{12^2+4\times20\times69.5+6.28\times4\times12+8\times4^2}\ \text{mm}$$

$$=\sqrt{6\ 134.4}\ \text{mm}\approx78\ \text{mm}$$

3）确定是否用压边圈：毛坯相对厚度 $\frac{t}{D}\times100=\frac{1}{78}\times100\approx1.28$，查表 3.4-1，应采用压边圈。

4）确定拉深次数：采用查表法，当 $\frac{t}{D}\times100=1.28$，$\frac{h}{d}=3.7$（包括修边余量后的 h 为 74 mm）时，由表 3.4-19 查得 $n=4$。

5）确定各次拉深直径：由表 3.4-15 查得各次拉深的极限拉深系数为 $m_1=0.50$，$m_2=0.75$，$m_3=0.78$，$m_4=0.80$，则各次拉深直径为：

$d_1=0.50\times78\ \text{mm}=39\ \text{mm}$

$d_2=0.75\times39\ \text{mm}=29.3\ \text{mm}$

$d_3=0.78\times29.3\ \text{mm}=22.8\ \text{mm}$

$d_4=0.80\times22.8\ \text{mm}=18.3\ \text{mm}$

$d_4=18.3\ \text{mm}<20\ \text{mm}$（工件直径），说明允许的变形程度未用足，应对各次拉深系数作适当调整，使均大于相应的根限拉深系数。经调整后，实际选取 $m_1=0.53$，$m_2=0.76$，



$m_3=0.79$，$m_4=0.82$，则各次拉深直径确定为：

$d_1=0.53\times78\ \text{mm}=41\ \text{mm}$

$d_2=0.76\times41\ \text{mm}=31\ \text{mm}$

$d_3=0.79\times31\ \text{mm}=24.5\ \text{mm}$

$d_4=0.82\times24.5\ \text{mm}=20\ \text{mm}$

6）选取各次半成品底部的圆角半径：根据 $r_d=0.8\sqrt{(D-d)\ t}$和 $r_p=(0.6\sim1)\ r_d$ 的关系，取各次的 r_p（即半成品底部的圆角半径）分别为：$r_{p1}=5$ mm，$r_{p2}=4.5$ mm，$r_{p3}=4$ mm，$r_{p4}=3.5$ mm。

7）计算各次拉深高度：由表 3.4-20 的有关公式计算可得：

$$h_1=0.25\ (Dk_1-d_1)\ +0.43\frac{r_{p1}}{d_1}\ (d_1+0.32r_{p1})$$

$$=0.25\left(78\times\frac{78}{41}-41\right)\ \text{mm}+0.43\times\frac{5}{41}(41+0.32\times5)\ \text{mm}$$

$$=30.4\ \text{mm}$$

$$h_2=0.25\ (Dk_1k_2-d_2)\ +0.43\times\frac{r_{p2}}{d_2}\ (d_2+0.32r_{p2})$$

$$=0.25\left(78\times\frac{78}{41}\times\frac{41}{31}-31\right)\ \text{mm}+0.43\times\frac{4.5}{31}(31+0.32\times4.5)\ \text{mm}$$

$$=43.4\ \text{mm}$$

$$h_3=0.25\ (Dk_1k_2k_3-d_3)\ +0.43\frac{r_{p3}}{d_3}\ (d_3+0.32r_{p3})$$

$$=0.25\left(78\times\frac{78}{41}\times\frac{41}{31}\times\frac{31}{24.5}-24.5\right)\ \text{mm}+0.43\times\frac{4}{24.5}(24.5+0.32\times4)\ \text{mm}$$

$$=58\ \text{mm}$$

$h_4=74$ mm

8）画出工序图，如图 3.4-38 所示。

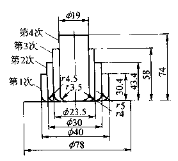


图 3.4-38 圆筒形拉深件工序图

4 带凸缘圆筒形件的拉深

带凸缘筒形件的拉深变形原理与一般圆筒形件的拉深是相同的，但其拉深方法及计算方法有一定的差别。

4.1 拉深特点

带凸缘的圆筒件拉深时，毛坯凸缘部分不是全部拉进凹模，而是只拉深到毛坯外径等于零件凸缘外径时为止，如图 3.4-39 所示。带凸缘的筒形件可分为窄凸缘筒形件和宽凸缘筒形件。窄凸缘零件可当作圆筒件拉深，而宽凸缘零件与直壁圆筒件拉深不同。当宽凸缘零件不能一次拉深成功，必须进行多次拉深时，首先在第一次拉深中就拉出所需的凸缘外径，在以后各次拉深中，凸缘直径基本保持不变。因为凸缘尺寸有微小的收缩，都会引起很大的变形应力，而使底部危险断面拉裂。

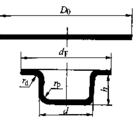


图 3.4-39 带凸缘的筒形件

4.2 拉深系数

带凸缘筒形件拉深时，其第一次拉深系数为

$$m_F=\frac{d}{D_0} \tag{3.4-20}$$

式中，d 为拉深件筒形部分的直径；D_0 为毛坯直径。

当零件的底部圆角半径与凸缘部分圆角半径相等，而且均为 r 时，毛坯直径 D_0 为：

$$D_0=\sqrt{d_F^2+4dh-3.44dr} \tag{3.4-21}$$

将式（3.4-21）代人式（3.4-20）得

$$m_F=\frac{d}{D_0}=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d_F}{d}\right)^2+4\frac{h}{d}-3.44\frac{r}{d}}} \tag{3.4-22}$$

式中，d_F/d 为凸缘的相对直径；h/d 为相对拉深高度；r/d 为底部及凸缘部分相对圆角半径。

由式（3.4-22）可见，有凸缘的圆筒形零件的拉深系数决定于三个尺寸因素：凸缘的相对直径 d_F/d，零件的相对拉深高度 h/d 和相对圆角半径 r/d。其中 d_F/d 的影响最大，而 r/d 的影响最小。凸缘的相对直径 d_F/d 及相对高度 h/d 越大，表示拉深时毛坯变形区的宽度越大，拉深的难度也越大。

带凸缘筒形件，第一次及其以后各次极限拉深系数分别见表 3.4-21 和表 3.4-22。

表 3.4-21 带凸缘拉深件的第一次极限拉深系数

d_F/d	$(t/D)\times100$				
	0.1～0.3	0.3～0.6	0.6～1.0	1.0～1.5	1.5～2.0
<1.1	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
>1.1～1.3	0.55	0.54	0.53	0.51	0.49
>1.3～1.5	0.52	0.51	0.50	0.49	0.47
>1.5～1.8	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45
>1.8～2.0	0.45	0.45	0.44	0.43	0.42



续表 3.4-21

d_F/d	$(t/D)\times100$				
	0.1~0.3	0.3~0.6	0.6~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
>2.0~2.2	0.42	0.42	0.42	0.41	0.40
>2.2~2.5	0.38	0.38	0.38	0.38	0.37
>2.5~2.8	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34
>2.8~3.0	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32

注：表中数值适用于08、10号钢。

表 3.4-22 带凸缘拉深件以后各次拉深系数 m_F

拉深系数 m_F	$(t/D)\times100$				
	0.1~0.3	0.3~0.6	0.6~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
m_2	0.80	0.78	0.76	0.75	0.73
m_3	0.82	0.80	0.79	0.78	0.75
m_4	0.84	0.83	0.82	0.80	0.78
m_5	0.86	0.85	0.84	0.82	0.80

注：表中数值适用于08、10号钢。

应当指出，带凸缘筒形件拉深的第一次拉深系数 $m_1=d_1/D_0$ 不能确切表示其变形程度，因为用直径 D_0 的毛坯，拉成直径 d_1 的凸缘零件，可以有各种凸缘直径 d_F 和高度 h，如图 3.4-40 所示。

凸缘的直径和零件高度不同，其变形程度显然是不同的。凸缘直径愈小，零件高度愈大，其变形程度愈大。

用零件相对高度 h/d 与第一次拉深允许的相对高度相比较，来确定零件能否一次拉深成功更确切些。带凸缘筒形件，第一次拉深允许的相对高度 h_1/d_1 可从表 3.4-23 中查出。

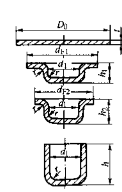


图 3.4-40 带凸缘筒形件第一次拉深系数与拉深变形程度的关系

表 3.4-23 带凸缘筒形件第一次拉深许可的相对高度 (h_1/d_1)

d_F/d	$(t/D)\times100$				
	>0.06~0.2	>0.2~0.5	>0.5~1.0	>1.0~1.5	>1.5~2.0
≤1.1	0.45~0.52	0.50~0.62	0.57~0.70	0.60~0.80	0.75~0.90
>1.1~1.3	0.40~0.47	0.45~0.53	0.50~0.60	0.56~0.72	0.65~0.80
>1.3~1.5	0.35~0.42	0.40~0.48	0.45~0.53	0.50~0.63	0.58~0.70
>1.5~1.8	0.29~0.35	0.34~0.39	0.37~0.44	0.42~0.53	0.48~0.58
>1.8~2.0	0.25~0.30	0.29~0.34	0.32~0.38	0.36~0.46	0.42~0.51
>2.0~2.2	0.22~0.26	0.25~0.29	0.27~0.33	0.31~0.40	0.35~0.45
>2.2~2.5	0.17~0.21	0.20~0.23	0.22~0.27	0.25~0.32	0.28~0.35
>2.5~2.8	0.16~0.18	0.15~0.18	0.17~0.21	0.19~0.24	0.22~0.27
>2.8~3.0	0.10~0.13	0.12~0.15	0.14~0.17	0.16~0.20	0.18~0.22

注：1. 极大值相应于零件圆角半径较大情况 $r_F=(10\sim20)\ t$，极小值相应于零件圆角半径较小情况 $r_F=(4\sim8)\ t$。
2. 表中数值适用于08、10号钢。

4.3 拉深方法

(1) 窄凸缘零件（$d_F/d=1.1\sim1.4$）的拉深方法

如图 3.4-41，窄凸缘零件拉深与无凸缘圆筒件拉深相同，只是在倒数第二道工序或最后一道工序才拉出水平凸缘或拉出锥形凸缘，再通过整形将凸缘压平成直径 d_F。

(2) 宽凸缘零件（$d_F/d>1.4$）的拉深方法

如图 3.4-42 所示的宽凸缘零件的拉深，如不能一次拉深成形需要多次拉深时，为了在各次拉深中保持凸缘外径不变，则采用以下两种方法进行拉深。

1）对于中小型零件（$d_F<200$ mm）。通常采用减小筒形部分直径，增大高度来达到。而凸、凹模圆角半径 r_p 和 r_d

基本上保持不变，如图 3.4-42a 所示。

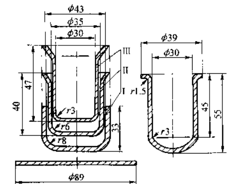


图 3.4-41　带凸缘件的拉深

2）对于大型零件（$d_F > 200$ mm）。通常采用逐渐缩小筒形部分直径，并相应减小凸凹模圆角半径 r_p 和 r_d 来达到，高度基本不变，如图 3.4-42b 所示。

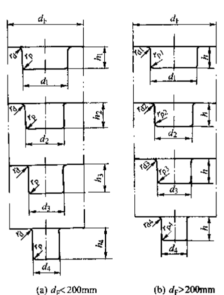


图 3.4-42　宽凸缘零件的多次拉深

第一种方法不易起皱，但零件表面质量不高，容易在直壁部分和凸缘上残留有中间工序形成的圆角部分的弯曲和厚度局部变化的痕迹。第二种方法得到的零件表面较好，厚度均匀，不存在中间拉深工序圆角部分的弯曲和厚度局部变化的痕迹。但这种方法只适用于料厚较大的零件。因为料薄时，在第一次拉深成大圆角的曲面形状时容易起皱。在实际生产中往往将上述两种方法综合起来使用。

为了使以后拉深时，凸缘外径尺寸不变，把首次拉入凹模的毛坯面积加大 3%～5%，在模具设计时适当加大第一个半成品圆筒部分高度，而在第二、第三次拉深时减少这部分面积的 1%～3%。这些材料在以后各次拉深中，逐渐挤回到凸缘上，并使筒口附近凸缘逐渐增厚，但不会影响零件质量。

为了在拉深中不使凸缘产生变形，就要正确计算拉深高度和严格控制凸模进入凹模的深度。各次拉深高度按下式计算：

第一次拉深

$$h_1 = \frac{0.25}{d_1}(D_0^2 - d_F^2) + 0.43(r_p + r_d) + \frac{0.14}{d_1}(r_p^2 - r_d^2) \tag{3.4-23}$$

以后各次拉深

$$h_n = \frac{0.25}{d_n}(D_0^2 - d_F^2) + 0.43(r_{pn} + r_{dn}) + \frac{0.14}{d_n}(r_{pn}^2 - r_{dn}^2) \tag{3.4-24}$$

式中，h_1、d_1 为首次拉深工件的高度、直径，mm；h_n、d_n 为以后各次拉深工件的高度、直径，mm；D_0 为毛坯直径，mm；r_p、r_d 为首次拉深的凸、凹模圆角半径。mm；r_{pn}、r_{dn} 为以后各次拉深的凸、凹模圆角半径，mm。

现举例说明带凸缘圆筒形拉深件的工序计算步骤。

例：如图 3.4-43 所示的带凸缘拉深件，材料为 10 号钢，厚度 $t = 2$ mm，求拉深次数及半成品尺寸。

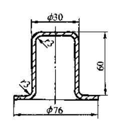


图 3.4-43　带凸缘拉深件

计算步骤如下。

因材料厚度较大，故按中线尺寸计算。

1）计算 d_F/d、h/d 和 t/D_0　凸缘相对直径 $d_F/d = 76/28 = 2.7$，查表 3.4-6，取修边余量 $\Delta h = 2$ mm。故凸缘实际外径为：　$d_F = 76 + 4 = 80$ mm

则实际的　$d_F/d = 80/28 = 2.86$ mm

零件相对高度　$h/d = 60/28 = 2.14$

初始毛坯直径

$$\begin{aligned} D_0 &= \sqrt{[(d_1^2 + 4d_2h) + 2\pi r(d_1 + d_2) + 4\pi r^2] + (d_4^2 - d_3^2)} \\ &= \sqrt{[(20^2 + 4\times28\times52) + 2\times3.14\times4(20+28) + 4\times3.14\times4^2] + (80^2 - 36^2)} \\ &= \sqrt{7\,630 + 5\,104} \approx 113 \text{ mm} \end{aligned}$$

（$7\,630\times\pi/4$ 为带凸缘零件圆筒部分表面积）

相对厚度（t/D_0）×100 =（2/113）×100 = 1.77

2）确定一次能否拉深成功　查表 3.4-23 得 $h_1/d_1 = 0.22$ 因 $h_1/d_1 < h/d$，故一次不能拉出。

3）求第一次拉深后半成品尺寸

① 计算 d_1　初选 $d_F/d = 1.1$，查表 3.4-21 取 $m_1 = 0.51$，则 $d_1 = m_1 D_0 = 0.51\times113 = 58$ mm

② 确定 r_p、r_d　r_p、r_d 按经验公式计算，即

$$r_p = r_d = 0.8\sqrt{(D - d_1)t} = 0.8\sqrt{(113 - 58)\times2} = 8.4 \text{ mm}$$

③ 计算第一次拉深高度　为使凸缘外径在以后的拉深中尺寸不变，将第一次拉入凹模的毛坯面积比原制件相应部分表面积多拉入 5%，故毛坯直径修正为：

$$D_1 = \sqrt{7\,630\times1.05 + 5\,104} = 116 \text{ mm}$$

第一次拉深高度为：

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{0.25}{d_1}(D_1^2 - d_F^2) + 0.43(r_{p1} + r_{d1}) + \frac{0.14}{d_1}(r_{p1}^2 - r_{d1}^2) \\ &= \frac{0.25}{58}(116^2 - 80^2) + 0.43\times(8.4 + 8.4) = 38.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

4）验算 m_1 选得是否正确　第一次拉深相对高度 $h_1/d_1 = 38.5/58 = 0.66$，查表 3.4-23，当 $d_F/d_1 = 80/58 = 1.38$ 时，$h_1/d_1 = 0.70$。

即许可的相对高度大于第一次拉深相对高度（0.7 > 0.66），说明 m_1 选得是恰当的。



5）求以后各次拉深半成品尺寸：根据表 3.4-22，取 $m_2=0.73$，$m_3=0.75$，$m_4=0.78$，则

$d_2=0.73\times58\text{ mm}=42.4\text{ mm}$

$d_3=0.75\times42.4\text{ mm}=31.8\text{ mm}$

$d_4=0.78\times31.8\text{ mm}=24.8\text{ mm}$

因 $d_4<d$（零件直径），故将各次拉深系数作适当调整。

取 $m_2=0.75$，$m_3=0.78$，$m_4=0.83$，因而各次拉深直径为：

$d_2=0.75\times58\text{ mm}=43.5\text{ mm}$

$d_3=0.78\times43.5\text{ mm}=33.9\text{ mm}$

$d_4=0.83\times33.9\text{ mm}=28\text{ mm}$

确定以后各次拉深模具圆角半径：

$$r_{p2}=r_{d2}=0.8\sqrt{(d_1-d_2)t}=0.8\sqrt{(58-43.5)\times2}\text{ mm}$$
$$=4.3\text{ mm}(\text{取 }4.4\text{ mm})$$

$$r_{p3}=r_{d3}=0.8\sqrt{(d_2-d_3)t}=0.8\sqrt{(43.5-33.9)\times2}\text{ mm}$$
$$=3.5\text{ mm}(\text{取 }3.6\text{ mm})$$

$$r_{p4}=r_{d4}=0.8\sqrt{(d_3-d_4)t}=0.8\sqrt{(33.9-28)\times2}\text{ mm}$$
$$=2.7\text{ mm}(\text{取 }3.0\text{ mm,使之与零件尺寸相同})$$

第二次拉深时，多拉入 3% 的材料，使其余 2% 材料挤压到凸缘上，这时相当的毛坯直径为：

$$D_2=\sqrt{7\,630\times1.05\times\frac{1.03}{1.05}+5\,104}\text{ mm}=\sqrt{7\,630\times1.03+5\,104}\text{ mm}$$
$$=114\text{ mm}$$

第二次拉深高度为：

$$h_2=\frac{0.25}{d_{21}}(D_2^2-d_F^2)+0.43(r_{p2}+r_{d2})+\frac{0.14}{d_2}(r_{p2}^2-r_{d2}^2)$$
$$=\frac{0.25}{43.5}(114^2-80^2)\text{mm}+0.43\times(5.4+5.4)\text{mm}=42.5\text{ mm}$$

第三次拉深时，多拉入 1.5% 的材料，余下 0.5% 的材料又挤压在凸缘上，这时相应的毛坯直径为

$$D_3=\sqrt{7\,630\times1.015+5\,104}\text{ mm}=113\text{ mm}$$

第三次拉深高度为：

$$h_3=\frac{0.25}{d_3}(D_3^2-d_F^2)+0.43(r_{p3}+r_{d3})$$
$$=\frac{0.25}{33.9}(113^2-80^2)\text{mm}+0.43\times(4.6+4.6)\text{mm}=51\text{ mm}$$

第四次拉深高度取零件高度，$h_4=60$ mm。计算结果列于表 3.4-24。

表 3.4-24 带凸缘拉深件的拉深次数及半成品尺寸

拉深次数	拉深直径 d/mm	拉深高度 h/mm	凸凹模圆角半径/mm	
			r_p	r_d
1	60	38.5	8.4	8.4
2	45.5	42.5	4.4	4.4
3	35.9	51	3.6	3.6
4	30	60	3.0	3.0

5 回转体阶梯形件的拉深

5.1 阶梯形件拉深次数的确定

阶梯形拉深件的变形特点与圆筒形件基本相同。但由于这类零件结构的多样性及复杂性，因而不能用统一的方法来制定其拉深工艺。阶梯形件拉深的主要问题是要解决该阶梯形件是否可以一次拉成，还是需要多次才能拉成。

能否一次拉出，可以用下述近似方法判断，即：求出工件的高度与最小阶梯直径之比 h/d_n，再与按相应圆筒形件一次所能拉深的相对高度相比，若前者比相应的圆筒形件允许的相对高度要小或相等，则可一次拉成，否则就需多次拉深。

5.2 阶梯形件拉深原则

1）当任意两相邻阶梯直径的比值 d_n/d_{n-1} 都不小于相应圆筒形件的极限拉深系数，则其拉深方法是：每次拉深形成一个阶梯，由大阶梯到小阶梯依次进行拉深，如图 3.4-44 所示。此时拉深次数等于零件的阶梯数目。

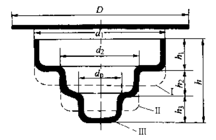


图 3.4-44 第一类阶梯形件的拉深顺序

2）当某相邻两阶梯直径比值 d_n/d_{n-1} 小于相应圆筒形件的极限拉深系数，则由直径 d_{n-1} 到 d_n 按带凸缘件的拉深方法，其拉深顺序由小阶梯到大阶梯依次拉深。如图 3.4-45 所示零件，其中 d_2/d_1 小于相应的圆筒形件的极限拉深系数，故在 d_2 先拉出后，最后才用工序Ⅴ拉出 d_1。

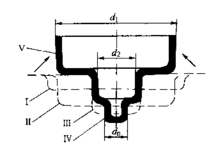


图 3.4-45 第二类阶梯形件的拉深顺序

当最小的阶梯直径 d_n 过小，也就是比值 d_n/d_{n-1} 过小，但最小阶梯的高度 h_n 不大时，则最小阶梯可以用胀形法得到。

3）对于浅阶梯形零件，而阶梯直径差别大不能一次拉出时，成功的经验是：首次先拉出球面形状，如图 3.4-46a 所示，或先拉出大圆角的圆筒形件，如图 3.4-46b，然后用校形工序得到零件的最后形状和尺寸。

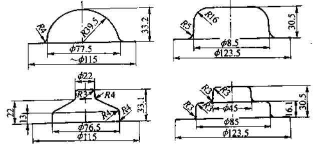


图 3.4-46 浅阶梯形拉深件的成形法

4）当拉深大、小直径差值大，阶梯部分带锥形的零件时，应先拉出大直径，再在拉深小直径的过程中拉出侧壁锥形，如图 3.4-47 所示。

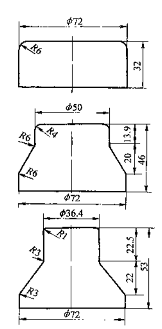


图 3.4-47 带锥形阶梯零件的拉深

当拉深大、小直径差值大，阶梯部分带曲面锥形的零件时，可采用直接法，如图 3.4-48 所示，即：首先将大直径部分按图纸尺寸拉出来，此时将头部制成与图样近似的 R，其次再拉出小直径，如图 3.4-48a 所示。或者可采用阶梯拉深法，如图 3.4-48b 所示，首先将大直径按图样尺寸拉出来，

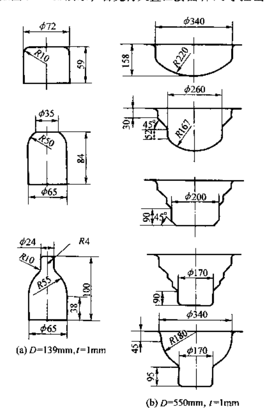


图 3.4-48 带曲面阶梯零件的拉深

然后用多次拉深作成与锥形近似的阶梯形状，最后经整形达到所要求的形状和尺寸。

6 盒形件拉深

6.1 盒形件的拉深特点

盒形件可以看成由直边部分及圆角部分组成。盒形件拉深变形时，圆角部分近似圆筒形件的拉深，直边部分近似板料弯曲。因此，盒形件的拉深成形是圆角部分拉深和直边部分弯曲两种变形方式的复合。

但是，盒形件的圆角及直边是联系在一起的整体，因而变形时必然有相互作用及影响，以致圆角部分不是简单的圆筒形件的拉深，直边部分不是简单的平板弯曲。

如在盒形件毛坯上画上纵横间距相同的网格，拉深后网格的间距发生了明显的变化，见图 3.4-49 所示。直边部分：横向间距缩小，愈靠角部缩小愈多；纵向间距增大，愈靠盒形边缘增大愈大。这说明在拉深时，圆角部分的材料要向直边流动，使直边部分材料受压。其结果使横向间距变小，纵向间距变大，愈靠近角部变化愈大。

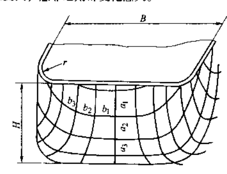


图 3.4-49 盒形件拉深时的网格变化

上述现象表明，盒形件拉深时，直边部分并不是单纯的弯曲变形。由于圆角部分的材料要向直边流动，因而直边部分也产生了横向压缩、纵向伸长的变形。而圆角部分，由于直边的存在，金属的流动，使得圆角部分的变形程度大为减小。因此，盒形件的变形特点可归纳为以下几点：

1）盒形件拉深时，角部变形基本上与圆筒形件拉深变形相似，只是由于金属向直边流动使得径向应力 σ_1 及切向应力 σ_3 在角部的分布是不均匀的，圆角中部最大，逐渐向两边减小，如图 3.4-50 所示。

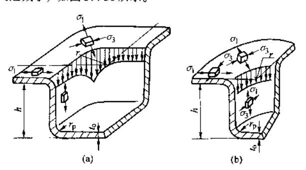


图 3.4-50 盒形件拉深时的应力分布

2）盒形件拉深时，直边部分除弯曲变形外，在与圆角的连接部分，还有横向压缩及纵向伸长。因而其应力也包括纵向拉应力与横向压应力两部分。

3）盒形件拉深时，圆角部分径向拉应力的分布是不均匀的，而其平均应力比之相同半径的圆筒形件径向拉应力要小得多。因而盒形件的极限变形程度可相应加大，拉深系数



可相应减小。

4）盒形件的最大应力出现在角部，因而破裂、起皱等现象也多在角部产生。在远离角部的直边部分一般不会产生起皱。

5）盒形件变形时，圆角与直边相互影响的大小，取决于其相对角部圆角半径 r/B 的比值。r/B 数值愈小，两者的变形影响愈显著，圆角部分的变形情况与圆筒形件的变形情况差别愈大。当 $r/B=0.5$ 时，盒形件就变成圆筒形件了。

6.2 盒形件首次拉深成形极限

盒形件的拉深变形程度，主要受到圆角部分侧壁强度的限制。而其拉深的极限变形程度，可用盒形件的相对高度 H/r 来表示。毛坯首次拉深可能达到的最大相对高度 H/r，取决于盒形件的相对角部圆角半径 r/B 以及毛坯相对厚度 t/D 等参数，还取决于材料的力学性能。

相对角部圆角半径 r/B 反映盒形件角部与直边相互影响的大小，r/B 愈小，影响愈大，所允许的 H/r 也愈大。

毛坯相对厚度 t/D，反映拉深件抗失稳能力的强弱，t/D 愈大，抗失稳能力愈强，因而所允许的 H/r 也愈大。

表 3.4-25 示出了 H/r 与 r/B 及 t/D 之间的关系。该表是按深拉深用 08 钢、10 钢软钢板制定的。对于其他材料，应根据拉深性能的好坏，对表中数值进行修正。例如：对于 20 钢、25 钢等拉深性能稍差的材料。采用 0.85～0.90 的修正系数。此外，对于 $B<100$ mm 的较小尺寸盒形件，取表中上限数值，对大尺寸盒形件取表中下限数值。

如果所拉深的盒形件的相对高度 H/r 不超过表中所列数值，则可一次拉成，否则必须多次拉深。

表 3.4-25 盒形件一次拉深最大相对高度 H/r

相对圆角半径 r/B	毛坯相对厚度（t/D）×100			
	2.0～1.5	1.5～1.0	1.0～0.5	0.5～0.2
0.30	4.0～3.3	3.7～3.2	3.3～3.0	3.0～2.8
0.20	5.0～4.5	4.5～4.1	4.3～3.5	4.0～3.5
0.15	6.0～5.0	5.3～4.7	5.0～4.3	4.7～4.0
0.10	8.0～6.0	7.0～5.5	6.5～5.0	6.0～4.5
0.05	14.0～10.0	12.0～9.0	11.0～8.0	10.0～7.0
0.02	25.0～20.0	22.5～17.5	20.0～15.0	17.5～12.5

6.3 盒形件毛坯尺寸计算

（1）一次拉深的盒形件毛坯尺寸计算

1）具有较小圆角半径（$r/(B-H)\leqslant 0.17$）的低盒形件的毛坯作图法　在这种条件下，仅在拉深件的圆角处是拉深，而直线部分的侧壁只是弯曲，毛坯的外形可用盒形件的几何展开方法，以平滑的外形与展开的四角相连而得，见图 3.4-51。

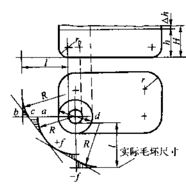


图 3.4-51 低盒形件的毛坯计算

计算和作图的顺序如下。

① 直边部分展开长度

$$l=H+0.57r_p \tag{3.4-25}$$

式中，$H=h+\Delta h$；h 为零件高度，mm；Δh 为盒形件的修边余量，mm，见表 3.4-26。

表 3.4-26 盒形件的修边余量　mm

拉深次数	1	2	3	4
修边余量 Δh	（0.03～0.05）h	（0.04～0.06）h	（0.05～0.08）h	（0.08～0.1）h

② 将圆角部分当作直径为 d、高度为 H 的圆筒形件展开，则有：

$$R=\sqrt{r^2+2rH-0.86r_p\ (r+0.16r_p)}$$

当 $r=r_p$ 时，则　$R=\sqrt{2rH}$

③ 连接成光滑外形，从 ab 线段中点 c 向圆弧 R 作切线，再以 R 为半径作圆弧与直线及切线相切，使面积 $+f=-f$。

2）具有较大圆角半径（$0.17<r/(B-H)<0.4$）的盒形件的毛坯作图法　在这种情况下，材料由圆角处挤向拉深件侧壁较多，并增加了侧壁的高度，毛坯计算和作图的顺序如下：

① 根据上述公式求出弯曲部分的长度 l 和毛坯半径 R。

② 作出由圆角到直边的过渡毛坯。

③ 求出加大了的毛坯半径 $R_1=xR$，以补偿挤入侧壁的材料，系数 x 按式（3.4-26）求得：

$$x=0.074\left(\frac{R}{d}\right)^2+0.982 \tag{3.4-26}$$

或根据拉深件的相对尺寸 H/B 在表 3.4-27 中查得。

表 3.4-27 计算盒形件毛坯尺寸所用系数 x 及 y 值

角部相对圆角半径 r/B	系数 x 的值				系数 y 的值			
	相对拉深高度 H/B							
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6
0.10	—	1.09	1.12	1.16	—	0.15	0.20	0.27
0.15	1.05	1.07	1.10	1.12	0.08	0.11	0.17	0.20
0.20	1.04	1.06	1.08	1.10	0.06	0.10	0.12	0.17
0.25	1.035	1.05	1.06	1.08	0.05	0.08	0.10	0.12
0.30	1.03	1.04	1.05	—	0.04	0.06	0.08	—

④ 求出从直壁展开部分切去的多余宽度 h_a 和 h_b，这部分将由圆角处挤入的材料补偿，见图 3.4-52。

$$h_a = y\frac{R^2}{A-2r} \quad h_b = y\frac{R^2}{B-2r}$$

y 值由表 3.4-27 查得。

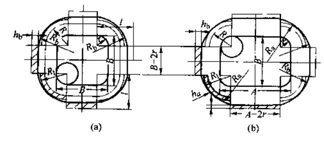


图 3.4-52 拉深具有较大的圆角半径的低盒形件的毛坯作图法

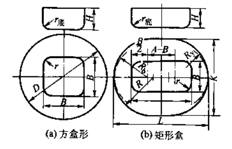
⑤ 对展开尺寸进行修正，即将半径增大到 R_1，将长度减少 h_a 及 h_b。

⑥ 根据修正后的长度、宽度和毛坯半径，再用半径为 R_a 和 R_b 的圆弧连成光滑的外形，就可得出所要求的毛坯形状和尺寸。这种作法适用于 $A:B=1.5\sim2$ 以下的矩形盒形件。

3) 具有很大圆角半径（$r/(B-H)\geqslant0.4$）且较高盒形件的毛坯作图法　这类拉深件的毛坯形状可近似为圆或带圆弧形的椭圆，不用几何作图法求出毛坯，而用计算方法求得。对于方盒形件（宽度为 B、高度为 H），当圆角和底角半径相等时（如图 3.4-53），毛坯直径可按式（3.4-27）计算：

$$D=1.13\sqrt{R^2+4B(H-0.43r)-1.72r(H+0.33r)} \tag{3.4-27}$$

式中，H 为包括余量的工艺高度，mm；r 为相等的圆角和底角半径，mm。



(a) 方盒形　(b) 矩形盒

图 3.4-53 角部圆角半径大的低盒形拉深件的毛坯形状与尺寸

当拉深件的圆角大于底角半径时，毛坯直径按式（3.4-28）求得：

$$D=1.13\sqrt{B^2+4B(H-0.43r_{底})-1.72r(H+0.5r)-4r_{底}(0.11r_{底}-0.18r)} \tag{3.4-28}$$

对于尺寸为 $A\times B$ 的矩形件，可以看作由两个宽度为 B 的正方形和中间部分（$A-B$）连接所组成的拉深件。这时毛坯的外形由半径为 R 的两个半圆和两平行边所构成，见图 3.4-53b。

按图示的方法求出毛坯的尺寸：

圆弧半径 R_b 的中心离拉深件短边的距离为 $B/2$。

椭圆形毛坯的长度为：

$$L=D+(A-B) \tag{3.4-29}$$

椭圆形毛坯的宽度为：

$$K=\frac{D(B-2r)+[B+2(H-0.43r_{底})](A-B)}{A-2r} \tag{3.4-30}$$

式中，$D=2R_b$ 是根据式（3.4-28）求出的 $B\times B$ 正方形件的毛坯直径。

在绝大多数情况下，$K<L$ 时毛坯为椭圆形，当 K 接近或等于 L 时，毛坯为圆形。椭圆短边方向毛坯圆弧半径可按式（3.4-31）求得：

$$R=0.5K \tag{3.4-31}$$

在尺寸 A 和 B 差别不大（$A<1.3B$），且 $H<0.8B$ 时，椭圆形毛坯的宽度可以直接等于 $2R_b$。

（2）多次拉深的盒形件毛坯尺寸计算

1) 具有较小圆角半径、高度比较低（$H/B\leqslant0.5\sim0.6$）的盒形件的毛坯确定。这类零件很难一次拉深出来，而要采用两次拉深以逐步缩小圆角和底角半径。第二次拉深近似整形，主要目的是用来减小角部和底部圆角半径，而其外形不变，因此，毛坯尺寸的求法和第（1）条中的 1）相同，见图 3.4-51。

同时，考虑到盒形件圆角部分要两次拉深，材料有向侧壁转移的现象，故建议将展开圆角半径 R 加大 10%～20%。当底部和角部的圆角半径相等时，R 可按式（3.4-32）求得：

$$R=(1.1\sim1.2)\sqrt{2rH} \tag{3.4-32}$$

两次拉深的相互关系（见图 3.4-54）应符合：

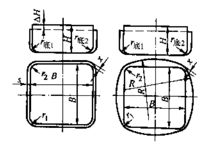


图 3.4-54 盒角半径进行整形的方盒形件的拉深

① 第一次和第二次拉深时，角部的圆角半径应有不同的中心。

② 第一次拉深后的半成品轮廓尺寸，已接近于成品拉深件的轮廓尺寸，故第二次拉深可不用压边圈。为此，两工序间的壁间距 s 和角间距 x 不宜太大。

壁间距 $s=(4\sim5)t$，角间距 $x\approx40\%s$，或 x 取 0.5～2.5 mm。

③ 第二次拉深高度的增量：

$$\Delta H=6-0.43(r_{底1}-r_{底2}) \tag{3.4-33}$$

式中，$r_{底1}$、$r_{底2}$ 分别为首次拉深和第二次拉深的底角半径。

如果 $s=0.43(r_{底1}-r_{底2})$，则 $\Delta H=0$，即两次拉深高度不变。

2) 高盒形件（$H/B\geqslant0.65\sim0.7$）多次拉深时的毛坯确定。毛坯尺寸是根据盒形件表面积与毛坯表面积相等的原则求得，毛坯尺寸的求法和第（1）条中的 3）相同，见式（3.4-27）和式（3.4-28）。

对于高矩形件多次拉深时的毛坯，可将矩形件的长边当作是中间由一个过渡部分连接的两半正方形所构成的拉深件。毛坯的外形是由半径为 R_b 的短边圆弧和半径为 R_a 的长边圆弧所组成的椭圆形，或是由两个半径为 $R=0.5K$ 的半圆与两个平行边所组成的长圆形，见图 3.4-55。椭圆形的长度 L 和宽度 K，可按式（3.4-29）和式（3.4-30）求得。椭圆宽边的圆弧半径：

$$R_a = \frac{0.25\ (L^2 + K^2)\ - LR_b}{K - 2R_b} \qquad (3.4\text{-}34)$$

图 3.4-55 高矩形件多次拉深时的毛坯外形

当矩形件的尺寸 A 及 B 相差不大，而相对高度很大时，可采用圆形毛坯。

6.4 盒形件的工艺计算

(1) 低盒形件的工艺计算

1) 低、高盒形件的界限 $H/B < 0.6 \sim 0.7$ 为低盒形件；$H/B > 0.6 \sim 0.7$ 为高盒形件。

2) 盒形件侧壁的变形以及材料所发生的转移导致下列结果：

① 与尺寸相同的圆筒形件的拉深相比，在圆角部分的变形大大减小了。

② 减小了切向的压应力，提高了凸缘的稳定性。

③ 盒形件在第一次拉深中，其角部的拉深系数与筒形件相比要小得多。

3) 盒形件在第一次拉深时的极限拉深系数，通常用毛坯圆角部分的假想拉深系数表示：

$$m = \frac{r}{R_y} \qquad (3.4\text{-}35)$$

式中，R_y 为毛坯圆角部分的假想半径（见图 3.4-52 中，R 即 R_y）；r 为角部的圆角半径。

圆角部分的假想拉深系数还可通过比值 H/r 来表示，因为

$$m = \frac{d}{D} = \frac{2r}{2\sqrt{2rH}} = \frac{1}{\sqrt{2H/r}} \qquad (3.4\text{-}36)$$

表 3.4-28 给出了 10 号钢在第一次拉深时 H/r 所能达到的最大比值。

对于塑性较差的材料进行拉深时，H/r 的数值可减小 5% ~ 7%，对塑性较好的材料进行拉深时 H/r 的数值可增大 5% ~ 7%。

表 3.4-29 是盒形件拉深时，比值 r/B 及毛坯相对厚度 $(t/D)\times 100$ 与拉深系数之间的近似关系。

表 3.4-28 10 号钢第一次拉深时的最大比值 H/r

比 值 r/B	方盒形件			矩形件		
	毛坯相对厚度 $(t/D)\times 100$					
	0.1 ~ 0.3	>0.3 ~ 1	>1 ~ 2	0.1 ~ 0.3	>0.3 ~ 1	>1 ~ 2
0.4	2.2	2.5	2.8	2.5	2.8	3.1
0.3	2.8	3.2	3.5	3.2	3.5	3.8
0.2	3.5	3.8	4.2	3.8	4.2	4.6
0.1	4.5	5.0	5.5	4.5	5.0	5.5
0.05	5.0	5.5	6.0	5.0	5.5	6.0

表 3.4-29 盒形件的拉深系数（材料：10）

比值 r/B	方盒形件第一次拉深			矩形件第一次拉深			方盒形、矩形件以后各次拉深		
	毛坯相对厚度 $(t/D)\times 100$								
	0.1 ~ 0.3	>0.3 ~ 1.0	>1.0 ~ 2.0	0.1 ~ 0.3	>0.3 ~ 1.0	>1.0 ~ 2.0	0.1 ~ 0.3	>0.3 ~ 1.0	>1.0 ~ 2.0
0.4	0.48	0.45	0.42	0.44	0.42	0.40	0.73	0.70	0.67
0.3	0.42	0.40	0.38	0.40	0.38	0.36	0.66	0.63	0.60
0.2	0.38	0.36	0.34	0.36	0.34	0.33	0.60	0.57	0.54
0.1	0.33	0.32	0.30	0.33	0.32	0.30	0.53	0.51	0.48
0.05	0.32	0.30	0.29	0.32	0.30	0.29	0.50	0.48	0.45

4) 盒形件以后各次圆角处的拉深系数，可用前后两道工序的圆角半径之比来表示，即：

$$m_n = \frac{r_n}{r_{n-1}} \qquad (3.4\text{-}37)$$

故各次的圆角半径为：$r_2 = m_2 r_1$，$r_3 = m_3 r_2$，……

5) 对于椭圆形和长圆形的拉深件，其第一次拉深系数可取 $m_1 = 0.40 \sim 0.45$，以后各次拉深系数可取 $m_n = 0.6 \sim 0.7$。

6) 对于有凸缘的盒形件，其拉深系数不仅视比值 r/B 与 t/D 而定，而且与凸缘的相对宽度有关，其值可略小于表 3.4-29 之值。

(2) 高盒形件的工艺计算



1）初步估算拉深次数。对于高盒形件，一般需要多次拉深，即先拉成较大的圆角，而后逐次减小圆角半径，直至达到工件要求。

盒形件的拉深系数为前后工序半成品角部圆角半径之比，故各次拉深的圆角半径为：$r_1 = m_1 R_y$　$r_2 = m_2 r_1$　$r_3 = m_3 r_2 \cdots\cdots$

根据盒形件的相对高度可由表 3.4-30 查出所需的拉深次数。但以后各次的拉深系数必须大于表 3.4-31 所列的数值。

表 3.4-30　盒形件多次拉深所能达到的最大相对高度 H/B

拉深次数	毛坯相对厚度（t/B）×100			
	0.3～0.5	0.5～0.8	0.8～1.3	1.3～2.0
1	0.50	0.58	0.65	0.75
2	0.70	0.80	1.0	1.20
3	1.20	1.30	1.6	2.0
4	2.0	2.2	2.6	3.5
5	3.0	3.4	4.0	5.0
6	4.0	4.5	5.0	6.0

表 3.4-31　盒形件以后各次许可拉深系数 m_n（材料：08、10）

r/B	毛坯相对厚度（t/D）×100			
	0.3～0.6	0.6～1.0	1.0～1.5	1.5～2.0
0.025	0.52	0.50	0.48	0.45
0.05	0.56	0.53	0.50	0.48
0.10	0.60	0.56	0.53	0.50
0.15	0.65	0.60	0.56	0.53
0.20	0.70	0.65	0.60	0.56
0.30	0.72	0.70	0.65	0.60
0.40	0.75	0.73	0.70	0.67

此外，拉深次数也可通过盒形件多次拉深的总拉深系数来估算。如直径为 D 的圆毛坯的方盒形件（$B \times B$）的拉深，其总拉深系数为：

$$m_{总} = \frac{4B}{\pi D} = 1.27\frac{B}{D} \tag{3.4-38}$$

由圆毛坯拉深矩形盒（$A \times B$）时：

$$m_{总} = \frac{2(A+B)}{\pi D} = 1.27\frac{A+B}{2D} \tag{3.4-39}$$

由椭圆形毛坯（$L \times K$）拉深矩形盒（$A \times B$）时：

$$m_{总} = \frac{2(A+B)}{0.5\pi(L+K)} = 1.27\frac{A+B}{L+K} \tag{3.4-40}$$

根据总拉深系数可由表 3.4-32 查出盒形件的拉深次数。

表 3.4-32　根据总拉深系数确定盒形件的拉深次数

拉深次数	毛坯相对厚度（t/D）×100 或（$t/(L+K)$）×200 时的拉深系数 $m_{总}$			
	2.0～1.5	1.5～1.0	1.0～0.5	0.5～0.2
2	0.40～0.45	0.43～0.48	0.45～0.50	0.47～0.58
3	0.32～0.39	0.34～0.42	0.36～0.44	0.38～0.46
4	0.25～0.30	0.27～0.32	0.28～0.34	0.30～0.36
5	0.20～0.24	0.22～0.26	0.24～0.27	0.25～0.29

2）确定各工序半成品形状及尺寸。高盒形件需要多次拉深，一般在前几次拉深时采用过渡形状：方盒形多用圆形过渡，矩形盒则用椭圆形或圆形过渡，而在最后一次才拉成方盒或矩形盒。因此，需要确定各道工序的过渡形状。确定高盒形件半成品形状和尺寸的方法较多，这里介绍几种较为常用的方法。

方法一：罗氏法。

该法首先确定倒数第二次（$n-1$ 次）拉深的半成品形状，往前逐次反推。

该法系采用平均拉深系数的概念，由于毛坯经过多次拉深，角部材料向直边的转移量很大，因此，不能像低盒形件那样仅仅考虑角部材料的变形程度，而要按照外形的平均变形程度作为该法进行计算的基础。

平均拉深系数：
$$m_s = \frac{B - 0.43r}{0.5\pi R_{s(n-1)}} \tag{3.4-41}$$

实际上，用 m_s 来进行计算和作图很不方便，因此，将式（3.4-41）化为：

$$R_{s(n-1)} = \frac{B - 0.43r}{1.57m_s} \tag{3.4-42}$$

$$s_n = R_{s(n-1)} - 0.5B = \frac{\left(1 - 0.785m_s - 0.43\dfrac{r}{B}\right)B}{1.57m_s} \tag{3.4-43}$$

s_n 为前后两次拉深时工序间的壁间距，以它作为计算的基础数据。

s_n 的数值与 r/B 及 m_s 有关，而 m_s 又与 r/B 及工序次数有关，所以 s_n 与 r/B 及工序次数有关。图 3.4-56 表示了这一关系，可供计算时查用。

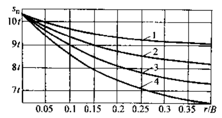
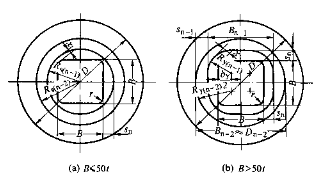


图 3.4-56　s_n 数值与比值 r/B 及预拉深次数（1～4）的关系曲线

不同材料相对厚度的盒形拉深件，其变形过程中材料稳定性也不相同，因此，各工序的过渡性状及尺寸计算有所差异。

确定高方盒形多次拉深的过渡形状有两种方法，如图 3.4-57，工序尺寸计算程序及有关公式列于表 3.4-33。

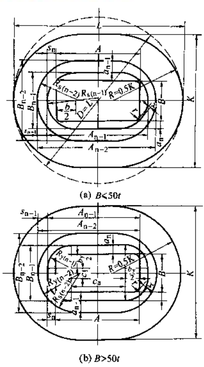


(a) $B<50t$　　(b) $B>50t$

图 3.4-57　不同的 t/B 比值时，多工序拉深方盒形件的各道工序程序

确定高矩形盒多次拉深的过渡性状有两种方法，如图 3.4-58，工序尺寸计算程序及有关公式列于表 3.4-34。





(a) $B \leqslant 50t$

(b) $B > 50t$

图 3.4-58 不同的 t/B 比值时，多工序拉深矩形件的各道工序程序

方法二：经验法。

高矩形件中间工序的过渡形状，还可采用下述经验法简捷地确定，如图 3.4-59 所示。

$$R_s = (4 \sim 5)\ r$$

$$x = (1/2 \sim 1/3)\ r \text{ 或 } 3 \sim 5\ \text{mm}$$

$$B_{(n-1)} = B/(0.76 \sim 0.9)$$

$$A_{(n-1)} = A/(0.76 \sim 0.9)$$

反拉深比一般拉深时的 R_s 要小，这时：

$$R_s = (2 \sim 3)\ r$$

$$x = (1/2 \sim 1/3)\ r$$

式中，A 为矩形盒长边尺寸，mm；B 为矩形盒短边尺寸，mm；x 为角间距，mm；R_s 为圆弧半径，mm；r 为工件侧壁之间的圆角半径，mm。

(3) 简易毛坯计算与工序次数的确定

1) 方盒形件的简易计算方法，见表 3.4-35。

2) 矩形件的简易计算方法，见表 3.4-36。

3) 按拉深件的相对高度 H/r 确定拉深次数，见表 3.4-37。

例：试制定图 3.4-60 所示矩形件拉深的工艺程序。

根据已知尺寸：$A = 197$ mm，$B = 92$ mm，$H_0 = 120$ mm，$r = 8$ mm，$r_{底} = 6$ mm，$t = 1.5$ mm。

则：

$$\frac{r}{B} = \frac{8}{92} = 0.087$$

$$\frac{H_0}{B} = \frac{120}{92} = 1.30 > 0.6$$

表 3.4-33 高方盒形多工序拉深的计算程序及计算公式

决定的数值		计算方法和计算公式	
		第一种方法（图 3.4-57a）	第二种方法（图 3.4-57b）
相对厚度		$(t/B) \times 100 \geqslant 2$；$B \leqslant 50t$	$(t/B) \times 100 < 2$；$B > 50t$
毛坯直径	$r = r_{底}$	$D = 1.13\sqrt{B^2 + 4B(H - 0.43r) - 1.72r(H + 0.33r)}$	
	$r \neq r_{底}$	$D = 1.13\sqrt{B^2 + 4B(H - 0.43r_{底}) - 1.72r(H + 0.5r) - 4r_{底}(0.11r_{底} - 0.18r)}$	
角部计算尺寸 $b_y < B$		—	$b_y \approx 50t$
工序间距离		$s_n \leqslant 10t$	
倒数第二道（$n-1$ 道）工序半径		$R_{s(n-1)} = 0.5B + s_n$	$R_{y(n-1)} = 0.5b_y + s_n$
倒数第二道工序宽度		—	$B_{n-1} = B + 2s_n$
角部间隙（包括 t 在内）		$x = s_n + 0.41r - 0.207B$	$x = s_n + 0.41r - 0.207b_y$
$(n-2)$ 道工序半径		$R_{s(n-2)} = R_{s(n-1)}/m_2 = 0.5Dm_1$	$R_{y(n-2)} = R_{y(n-1)}/m_{n-1}$
工序间距离		—	$s_{n-1} = R_{y(n-2)} - R_{y(n-1)}$
$(n-2)$ 道工序宽度（当 $n=4$）		—	$B_{n-2} = B_{n-1} + 2s_{n-1}$
$(n-2)$ 道工序直径（三道工序时）		—	$D_{n-2} = 2[R_{y(n-1)}/m_{n-1} + 0.7(B - b_y)]$
盒的高度		$H = (1.05 \sim 1.10)\ H_0$　H_0—图样上的高度	
倒数第二道（$n-1$ 道）工序高度		$H_{n-1} = 0.88H$	$H_{n-1} \approx 0.88H$
第一次拉深[$(n-2)$或$(n-3)$道工序]高度		$H_1 = H_{n-2} = 0.25\left(\frac{D}{m_1} - d_1\right) + 0.43\frac{r_1}{d_1}(d_1 + 0.32r)$	

注：1. 尺寸 s_n 根据比值 r/B（第一种方法）或 r/b_y（第二种方法）及拉深次数（参看图 3.4-56）确定。

2. 系数 m_1、m_2、m_{n-1} 根据筒形件拉深用的表列数值（见表 3.4-15）。

3. 在作图时，修正计算值是允许的。

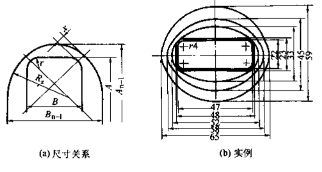
4. 上列拉深方法，也适用于材料相对厚度大于表中数值的情况。



表 3.4-34　高矩形件多工序拉深的计算程序及计算公式

决定的数值		计算方法和计算公式	
		第一种方法（图 3.4-58a）	第二种方法（图 3.4-58b）
相对厚度		$(t/B)\times100\geq2$；$B\leq50t$	$(t/B)\times100<2$；$B>50t$
假想毛坯直径	$r=r_{底}$	$D=1.13\sqrt{B^2+4B(H-0.43r)-1.72r(H+0.33r)}$	
	$r\neq r_{底}$	$D=1.13\sqrt{B^2+4B(H-0.43r_{底})-1.72r(H+0.5r)-4r_{底}(0.11r_{底}-0.18r)}$	
毛坯长度		$L=D+(A-B)$	
毛坯宽度		$K=D\dfrac{B-2r}{A-2r}+[B+2(H-0.43r)]\dfrac{A-B}{A-2r}$	
毛坯半径		$R=0.5K$	
工序比例系数		$x_1=(K-B)/(L-A)$	
工序间距离		$s_n=a_n\leq10t$	
角部计算尺寸 $b_y<B$		—	$b_y\approx50t$
倒数第二道（$n-1$ 道）工序半径		$R_{s(n-1)}=0.5B+s_n$	$R_{y(n-1)}=0.5b_y+s_n$
角部间隙（包括 t 在内）		$x=s_n+0.41r-0.207B$	$x=s_n+0.41r-0.207b_y$
$(n-1)$ 道工序尺寸		$B_{(n-1)}=2R_{s(n-1)}$；$A_{n-1}=A+2s_n$	$B_{(n-1)}=B+2a_n$；$A_{n-1}=A+2s_n$
$(n-2)$ 道工序半径		$R_{s(n-2)}=R_{s(n-1)}/m_{n-1}$	$R_{y(n-2)}=R_{y(n-1)}/m_{n-1}$ $R_{s(n-2)}=B_{(n-2)}/2$
工序间距离		$s_{n-1}=\dfrac{R_{s(n-2)}-R_{s(n-1)}}{x_1}$ $a_{n-1}=R_{s(n-2)}-R_{s(n-1)}$	$s_{n-1}=R_{y(n-2)}-R_{y(n-1)}$ $a_{n-1}=xs_{n-1}$
$(n-2)$ 道工序尺寸		$B_{n-2}=2R_{s(n-2)}$ $A_{n-2}=A+2(s_n+s_{n-1})$	$B_{n-2}=B+2(a_n+a_{n-1})$ $A_{n-2}=A+2(s_n+s_{n-1})$
盒的高度		$H=(1.05\sim1.10)H_0$　H_0——图样上的高度	
工序高度		$H_{n-1}=0.88H$	$H_{n-2}\approx0.86H_{n-1}$

注：同表 3.4-33。



(a) 尺寸关系　　(b) 实例

图 3.4-59　经验法

$$\frac{t}{B}\times100=\frac{1.5}{92}\times100=1.6<2$$

由上述计算可知：该件属于高矩形件。按表 3.4-34 所列的第二种方法计算。

1）选取修边余量 Δh，并确定矩形件的计算高度。

当 $\dfrac{H_0}{r}=\dfrac{120}{8}=15$，$\Delta h=0.05H_0=0.05\times120\text{ mm}=6\text{ mm}$

故　　$H=H_0+\Delta h=(120+6)\text{ mm}=126\text{ mm}$

2）假想毛坯直径（$r\neq r_{底}$）

$$D=1.13\sqrt{B^2+4B(H-0.43r_{底})-1.72r(H+0.5r)-4r_{底}(0.11r_{底}-0.18r)}$$
$$=1.13\sqrt{92^2+4\times92(126-0.43\times6)-1.72\times8(126+0.5\times8)-4\times6(0.11\times6-0.18\times8)}$$
$$=1.13\sqrt{52\,114}\text{ mm}=258\text{ mm}$$

3）毛坯长度

表 3.4-35　方盒形件的简易计算（材料：08）

H 与 B 的关系	D	拉深次数
$H<6r$	$B+1.5H$	1
$H=(0.6\sim1.2)B$	$2H$	2
$H=(1.2\sim2.0)B$	$B+H$	3
$H=(2.0\sim3.0)B$	$B/2+H$	4
$H=(4.0\sim5.0)B$	H	5
$H=(6.0\sim7.0)B$	$H-B$	6

表 3.4-36 矩形件的简易计算（材料：08）

H 与 B 的关系	L_1	L_2	拉深次数
$H<6r$	$B+1.6H$	$A+1.6H$	1
$H=B$	$B+1.3H$	$A+1.3H$	2
$H=1.5B$	$B+1.3H$	$A+1.2H$	3
$H=2.0B$	$B+(A-B)/2+H$	$A+H$	4
$H=(3.0\sim4.0)B$	$B+(A-B)/2+H$	$A+H$	5
$H=(5.0\sim6.0)B$	$B+(A-B)/2+H$	$A+H$	6

表 3.4-37 按 H/r 值确定拉深次数（材料：08）

H/r 数值	<6	7~12	13~17	18~23
拉深次数	1	2	3	4

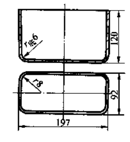


图 3.4-60 矩形盒拉深件
材料：08，料厚 1.5 mm

$L=D+(A-B)=258\ \text{mm}+(197-92)\ \text{mm}=363\ \text{mm}$

4）毛坯宽度

$$K=D\frac{B-2r}{A-2r}+[B+2(H-0.43r_{底})]\frac{A-B}{A-2r}$$

$$=\frac{258(92-2\times8)+[92+2(126-0.43\times6)](197-92)}{197-2\times8}\ \text{mm}$$

$=305\ \text{mm}$

5）毛坯半径

$$R=0.5K=0.5\times305\ \text{mm}=152.5\ \text{mm}$$

6）工序比例系数

$$x_1=(K-B)/(L-A)=\frac{305-92}{363-197}=1.28$$

7）初步估算所需拉深系数

根据$\frac{t}{B}\times100=\frac{1.5}{92}\times100=1.6$及$\frac{H_0}{B}=\frac{120}{92}=1.30$，查表 3.4-30 可知，拉深次数 $n=3$。

下面从倒数第二次（即 $n-1$ 次）起反推出各工序的过渡形状及尺寸。

8）工序间距离

查图 3.4-56，当$\frac{r}{B}=\frac{8}{92}=0.087$，$n=3$ 时，

$$s_n=9.2t=9.2\times1.5\ \text{mm}=13.8\ \text{mm}$$

$$a_n=s_n=13.8\ \text{mm}$$

9）假想宽度

$$b_y\approx50t=50\times1.5\ \text{mm}=75\ \text{mm}$$

10）$n-1$ 道工序半径

$R_{y(n-1)}=0.5b_y+s_n=(0.5\times75+13.8)\ \text{mm}=51.3\ \text{mm}$

11）角部間隙（包括 t 在内）

$x=s_n+0.41r-0.207b_y=(13.8+0.41\times8-0.207\times75)\ \text{mm}=1.6\ \text{mm}$

12）$n-1$ 道拉深尺寸

$B_{(n-1)}=B+2a_n=(92+2\times13.8)\ \text{mm}=119.6\ \text{mm}$

$A_{(n-1)}=A+2s_n=(197+2\times13.8)\ \text{mm}=224.6\ \text{mm}$

13）$n-2$ 道拉深半径

$$R_{y(n-2)}=R_{y(n-1)}/m_{n-1}=\frac{51.3}{0.74}\ \text{mm}=69.3\ \text{mm}$$

（$m_{n-1}=m_2$，由表 3.4-15 查得）

14）工序间距离

$s_{n-1}=R_{y(n-2)}-R_{y(n-1)}=(69.3-51.3)\ \text{mm}=18\ \text{mm}$

$a_{n-1}=x_1s_{n-1}=1.28\times18\ \text{mm}=23\ \text{mm}$

15）$n-2$ 道拉深尺寸

$B_{n-2}=B+2(a_n+a_{n-1})=92\ \text{mm}+2(13.8+23)\text{mm}=165.6\ \text{mm}$

$A_{n-2}=A+2(s_n+s_{n-1})=197\ \text{mm}+2(13.8+18)\text{mm}=260.6\ \text{mm}$

16）判断能否由平板毛坯直接拉到 $n-2$ 道的尺寸：

$$m_1=\frac{R_{y(n-2)}}{0.5D-0.707c_b}=\frac{69.3}{0.5\times258-0.707\times17}=0.59$$

（式中 $c_b=B-b_y=92-75=17$）

以$\frac{t}{D}\times100=\frac{1.5}{258}\times100=0.58$，由表 3.4-15 查得 $[m_1]=0.55<0.59$，表示可由平毛坯直接拉出 $n-2$ 道的尺寸，即共需三道拉深工序便可拉成，与初步估算的相一致。

如果计算结果发现，第一道拉深变形程度太小，即 m_1 较表中的值 $[m_1]$ 大得多，应调整各道工序尺寸，使变形量分配较为均匀。本例 $m_1=0.59$ 与 $[m_1]=0.55$ 差别不大，可不重新调整。

17）各道工序半成品的高度

$$H_{n-1}=0.88H=0.88\times126\ \text{mm}=111\ \text{mm}$$

$$H_{n-2}\approx0.86H_{n-1}=0.86\times111\ \text{mm}=96\ \text{mm}$$

过渡工序的凸模圆角半径（即 $r_{底}$）分别取如下值。

第一道拉深工序：$r_{底1}=10t=10\times1.5\ \text{mm}=15\ \text{mm}$；

第二道拉深工序：$r_{底2}=15t=15\times1.5\ \text{mm}=22\ \text{mm}$，且以45°倾斜侧壁与平底相连；

第三道拉深工序：$r_{底3}=4t=4\times1.5\ \text{mm}=6\ \text{mm}$，与工件要求的 $r_{底}$ 一致，故不需增加整形工序。



18）画出工序图，如图 3.4-61 所示。

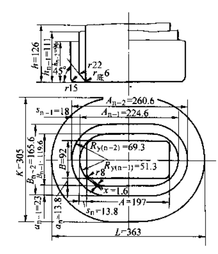


图 3.4-61　矩形件拉深工序图

6.5　盒形件拉深工序计算的新方法

有关盒形件拉深工序的计算方法，以往一直沿用罗氏法，但从大量生产实践中发现，这种方法并不是完美无瑕的，特别是关于高盒形件多次拉深，罗氏法计算程序特别繁杂，而且合理性和可靠性有不足之处，有时过于保守，有时局部变形过大而导致失败。近年来，我国冲压技术工作者，在盒形件冲压成形的理论研究和生产实践方面，都有许多新的成就和进展，有关工艺计算方法经生产实践验证，既简便又可靠，值得推广应用，现介绍如下。

（1）变形分析

各种高度的直壁方形盒与矩形盒的冲压变形，和直壁圆筒零件的冲压变形性质有相同之处，亦有不同之处。相同之处是变形区都是在径向拉应力与切向压应力的作用下产生拉深变形，而且存在着变形区所需的拉应力与传力区的承载能力之间的关系问题。不同之处是直壁盒形件变形区的应力状态和所产生的拉深变形在周边上的分布是不均匀的，由此而引起一系列和圆筒形件成形不同的特点。

1）盒形件一次拉深成形时，也就是由平板毛坯拉深成盒形件的变形过程中，在凸缘变形区内各处所受的应力状态不同（见图 3.4-62）。在圆角部分中心线 OA 上及盒形件两个对称轴线 CC' 与 EE' 上，都是径向受拉和切向受压的应力状态。但由于直边部分（BC 与 DE 部分）所产生的拉深变形较小，即其径向的伸长变形小于圆角部分，所以变形区内直边部分的流入速度大于圆角部分，以致在径向正应力和切向正应力之外，还有剪应力 τ 的作用。因此，变形区内各处的应力状态及其分布变得十分复杂，且各点的应力值随其位置的不同而产生较大的差异。

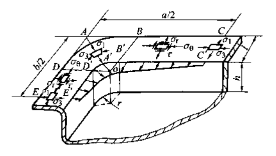


图 3.4-62　盒形件一次拉深时变形区的应力状态

2）盒形件的成形极限也受到变形区产生拉深变形所需的力和传力区的承载能力之间关系的限制。但由于直边部分对圆角部分的变形有减轻和带动作用，使盒形件的成形极限大于圆筒形零件，即盒形件的极限相对高度 H/r 大于相同材料在圆筒形拉深（使 $d=2r$，d 是圆筒形零件的直径；r 是盒形件直壁转角半径）时的极限相对高度 $H/0.5d$。而且，盒形件的相对圆角半径 r/B 越小，这个现象也越突出。

3）由直立侧壁的半成品拉深成盒形件时，变形区不可避免地会受到待变形区的约束与影响（图 3.4-63）。当立体半成品形状与尺寸不合适，会在变形区内沿周边产生严重的不均匀变形。沿宽度的纵向不均匀伸长变形受到毛坯直立侧壁 h_1 的阻碍，从而引起附加应力。附加拉应力引起材料的过度变薄或破裂；附加压应力则引起材料横向堆聚或起皱，使拉深变形变得困难，甚至失败。所以，高盒形件多次拉深时，必须遵循均匀变形的原则，也就是必须保证变形区各处的伸长变形趋于相等。

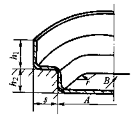


图 3.4-63　高盒形件末次拉深

（2）盒形件一次拉深

1）盒形件一次拉深的成形极限　盒形件一次拉深的成形极限与毛坯的形状关系很大。如果毛坯形状选择得合理，则拉深所得盒形件的口部比较平齐，也就是说沿盒形件的周边的拉深变形趋于均匀，这时能获得较大的拉深变形量。如 DD28 型电度表外壳采用铝板拉深成形，其外形尺寸为 103 mm × 103 mm，圆角半径为 9 mm，高度为 83 mm，料厚 0.8 mm，口部还略带点凸缘。按表 3.4-28 提供的数据计算，须采用两次拉深成形。选用圆形切弓形毛坯，毛坯外径为 237 mm，等分堆切去四个弓形，弓形高为 11 mm。结果采用一次拉深成形获得了成功。经过实验研究，认为盒形件一次拉深的极限相对高度可比表 3.4-28 的数据大大提高，推荐按表 3.4-38 选用。

表 3.4-38　盒形件一次拉深的最大相对高度 H/r

r/B	毛坯相对厚度 $t/D\times100$		
	0.3~0.6	0.6~1.0	1.0~2.0
0.40	2.2~2.4	2.4~2.8	2.8~3.4
0.30	3.0~3.3	3.3~3.8	3.8~4.7
0.20	4.5~4.8	4.8~5.4	5.4~6.5
0.10	8.5~9.6	9.6~11.0	11.0~13.0
0.05	11.0~12.5	12.5~14.0	14.0~16.0

经实验对方盒形推荐一种圆形切弓形的毛坯，即在圆形上对应于盒形件四角处切去四个弓形（见图 3.4-64）。其确定方法如下：先按面积相等原则计算出圆形毛坯直径 D_0，并根据盒形件的相对圆角半径 r/B 值查表 3.4-39 可得出 K 和 H/D，则圆形切弓形毛坯的直径 $D=KD_0$，弓形高 H 由 H/D 和直径 D 相乘得到。

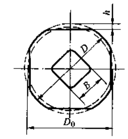


图 3.4-64 圆形切弓形毛坯

表 3.4-39 圆形切弓形毛坯的形状参数 K 和 H/D

盒形件相对圆角半径 r/B	K	H/D
0～0.10	1.037～1.032	0.048～0.043
0.10～0.25	1.032～1.027	0.043～0.039
0.25～0.50	1.027～1.0	0.039～0

2) 低椭圆筒形件拉深。椭圆筒形件在拉深时，沿变形区周边的应力、应变分布是不均匀的，不均匀程度将随 a/b（a—椭圆的长半轴；b—椭圆的短半轴）不同而异。曲率小者变形程度小，变形阻力小；曲率大者变形程度大，变形阻力也大。变形特点类似盒形件的拉深变形，即曲率小的地方对曲率大的地方有减轻和带动作用，并且随着 a/b 的增加，这种作用也在增加。

考虑到毛坯在变形过程中，曲率小的短轴部分的变形对曲率大的长轴部分的影响，应使毛坯长、短轴两处的材料比例要适当，以便得到口部平齐的合格零件。根据长轴处所对应的变形区的变形程度较大的特点，取该处的拉深系数 $m=r_a/R_a$（r_a—椭圆筒形件长轴处的曲率半径；R_a—按半径为 r_a 的圆筒形件拉深展开的毛坯半径）来表示椭圆筒形件的拉深变形程度。R_a 可按式（3.4-44）计算：

$$R_a=\sqrt{r^2+2rH-0.86r_{底}\ (r+0.16r_{底})}\qquad(3.4\text{-}44)$$

式中，$H=h_0+\Delta h$（Δh ——修边余量）；h_0 为椭圆筒形件高度；$r_{底}$ 为椭圆筒形件底部圆角半径。

然后，以长轴处的变形为基准，改变短轴处的毛坯尺寸，以调整短轴处变形对长轴处变形的影响，从而保证基本均匀变形的条件。基于这种想法，将长轴处按圆筒形件拉深变形展开来确定毛坯半径 R_a，得到长轴处变形区的宽度 $b_a=R_a-r_a$。设短轴处变形区宽度为 $b_b=KA$，如果能找到合适的 K 值，使两处变形区宽度比较合适，变形沿变形区周边分布就基本上均匀，这样得到的毛坯才是合理的（图 3.4-65）。因此，如何确定合理的 K 值，就成为确定合理毛坯的关键。

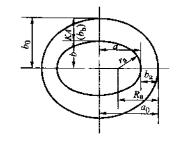


图 3.4-65 "K 值法"确定合理毛坯示意图

图 3.4-66 给出了四种常用材料（黄铜、低碳钢、不锈钢及纯铝）、不同椭圆度 a/b 的椭圆筒形件拉深的极限拉深系数及确定合理毛坯形状的 K 值。

根据不同材料及椭圆度，利用图 3.4-66b 可求出其极限拉深系数，同时利用图 3.4-66a 直接查出合理 K 值，从而可很方便地得出合理的毛坯形状（参见图 3.4-66 中箭头指向）。在非极限状态下，可直接利用图 3.4-66a 求合理 K 值，得出合理毛坯形状。因此，图 3.4-66b 使用起来比较方便，而且比较准确，但它的应用受材料种类不全的限制。

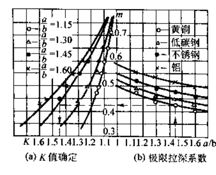


图 3.4-66 椭圆筒形件一次拉深的极限拉深系数 m 及确定合理毛坯形状的 K 值

另外，椭圆筒形件极限拉深系数可根据同种材料圆筒形件极限拉深系数按如下近似式（3.4-45）计算：

$$m_T=\sqrt{\frac{b}{a}}m_yK\qquad(3.4\text{-}45)$$

式中，m_T 为椭圆筒形件极限拉深系数；m_y 为圆筒形件极限拉深系数；K 为与材料性能有关的系数。

$K=1.04\sim1.08$。当材料拉深性能比较好时，取小值，反之取大值。当 $m_y\leqslant0.52$ 时可取下限。

如果给定某材料的一椭圆筒件，又知道该种材料的圆筒形件的极限拉深系数，根据上式算出椭圆筒件的极限拉深系数后，不用过多的计算就可判断此椭圆件能否一次拉深成形。

(3) 高盒形件的多次拉深

1) 高方形盒的多次拉深。高方形盒的多次拉深工艺过程可分成两大部分：首先是由毛坯 D 经多次拉深成末前道直径为 d_{n-1} 的圆筒。其次是由圆变方的拉深，即由直径为 d_{n-1} 的圆筒拉深成方盒。

设计计算步骤如下：

① 首先按等面积法确定毛坯尺寸 D（包括修边余量）。

② 根据零件宽度 B 和转角半径 r，求出相对转角半径 r/B。

③ 利用成形极限图（图 3.4-67）成表 3.4-40，选定合适的转角相对壁间距 δ/r。

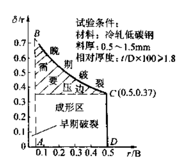


图 3.4-67 高方形盒末道拉深的成形极限图

④ 按式（3.4-46）计算末前道圆筒直径 d_{n-1}

$$d_{n-1}=1.414B-0.828r+2\delta\qquad(3.4\text{-}46)$$



式中，B 为方盒宽度（按内表面）；r 为方盒角部的内转角半径；δ 为转角壁间距，即末前道拉深所得圆筒毛坯内表面到盒形件转角的内表面的距离。

⑤ 根据常规的圆筒形件拉深工艺的计算方法，设计由毛坯 D 拉深出直径为 d_{n-1} 的圆筒件的拉深工艺过程。

表 3.4-40 转角极限相对壁间距

r/B	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
δ/r	0.62	0.52	0.46	0.42	0.37

2）高矩形盒的多次拉深　对于高矩形盒的多次拉深，由于长、宽边长不等，长边中心与转角中心在变形区内的拉深变形差别较短边中心与转角中心的差别较大，且随着矩形盒长宽比 A/B 的增加，这种差别也越大。因此，为了保证高矩形盒的顺利拉深成形，无疑也必须遵循均匀变形的原则。而保证均匀变形的条件是选用合理的角间距：$\delta=(0.2\sim0.25)\ r$。

高矩形盒多次拉深工艺的计算过程，也是从末前道向前推算。其末前道工序的形状，是由四段圆弧构成的椭圆形。长轴处的曲率半径 R_{an-1}，短轴处的曲率半径 R_{bn-1}，可分别用式（3.4-47）、（3.4-48）确定（见图 3.4-68）。

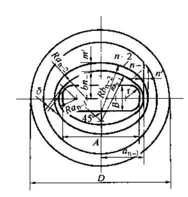


图 3.4-68　m 值法

$$R_{an-1}=0.705B-0.41r+\delta \quad (3.4\text{-}47)$$

$$R_{bn-1}=0.705A-0.41r+\delta \quad (3.4\text{-}48)$$

曲率中心分别在长轴和短轴上，即转角角分线与长、短轴的交点。椭圆的长半轴 a_{n-1} 与短半轴 b_{n-1}，可分别用式（3.4-49）、（3.4-50）求得：

$$a_{n-1}=R_{an-1}+1/2\ (A-B) \quad (3.4\text{-}49)$$

$$b_{n-1}=R_{bn-1}-1/2\ (A-B) \quad (3.4\text{-}50)$$

确定从椭圆到椭圆的中间工序过渡形状与尺寸有两种方法：“K 值法”和“m 值法”。

“K 值法”已在图 3.4-65 述及，现应用于高椭圆筒多次拉深时确定中间工序形状与尺寸。即按长轴处的拉深变形选取的拉深系数 $m_{n-2}=\dfrac{R_{an-1}}{R_{an-2}}$ 得到 R_{an-2} 及长轴处 $n-1$ 道与 $n-2$ 道两相邻工序间壁间距 $n'=R_{an-2}-R_{an-1}$。根据 m_{n-2}，由图 3.4-66a 查得合理的 K 值，得出短轴处的壁间距 $m'=Kn'$。$n-2$ 道工序的长半轴 $a_{n-2}=a_{n-1}+n'$，短半轴 $b_{n-2}=b_{n-1}+m'$。根据 a_{n-2} 和 b_{n-2} 用作图法作出 $n-2$ 道工序的形状，如图 3.4-69 所示。如果需要的话，依同样方法作出 $n-3$、$n-4$……等中间工序形状。

“m 值法”是选取合适的相邻两工序壁间距 n'、m' 的另一种方法，其实质是使长、短轴处的拉深变形程度基本相同

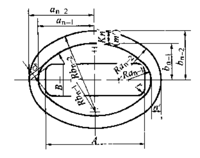


图 3.4-69　K 值法

（见图 3.4-68）。设 $m_a=\dfrac{R_{an-1}}{R_{an-1}+n'}$ 为长轴处的拉深系数，$m_b=\dfrac{R_{bn-1}}{R_{bn-1}+m'}$ 为短轴处的拉深系数。令 $m_a=m_b$，得到式（3.4-51）：

$$\frac{R_{an-1}}{R_{an-1}+n'}=\frac{R_{bn-1}}{R_{bn-1}+m'} \quad (3.4\text{-}51)$$

以上关系式即为椭圆筒件多次拉深的均匀变形条件。m_a 或 m_b 根据材料性能、拉深条件、拉深道次选取（也可参照圆筒形件第二道以后各道拉深系数选取），一般取 0.75～0.85。当给定 m_a 或 m_b 值后，由上式可求得 $n-1$ 道与 $n-2$ 道两相邻工序长、短轴处的壁间距 n' 和 m'，于是得到 $n-2$ 道工序的长半轴 $a_{n-2}=a_{n-1}+n'$；短半轴 $b_{n-2}=b_{n-1}+m'$。用作图法可作出 $n-2$ 道工序的形状（图 3.4-68）。如果需要的话，用同样方法可作出 $n-3$、$n-4$……等中间工序形状。

研究表明，当中间工序形状的椭圆度 a/b 不大于 1.3 时，该工序的毛坯可采用圆筒形，这是由大量的试验得知的。因此，当作出末前道（$n-1$ 道）椭圆形状之后，就要检查是否满足 $a_{n-1}/b_{n-1}<1.3$ 这一条件。如果已经满足，则 $n-1$ 以前各工序均为圆形。否则，就用 K 值法或 m 值法确定 $n-2$ 道的形状，作完后仍用上述条件进行检查。总之，不论作出哪一道椭圆后都要进行检查。只要满足上述条件，该工序就可用圆筒形坯件。

根据不同高度 H 和长宽比 A/B 的矩形盒的多次拉深工艺，大致有如下两种工艺过程：

① 圆形平板毛坯→圆筒形件（可为数道）→椭圆筒件（1～3 道）→矩形盒。

② K 值法求得的平板毛坯→椭圆筒件（1～3 道）→矩形盒。

至此，高矩形盒多次拉深的中间工序的形状与尺寸、椭圆过渡次数、圆到椭圆的过渡条件等问题已经解决。接下来的问题是判断何时用平板毛坯进行第一次拉深以及如何确定平板毛坯形状与尺寸。检查要从 $n-1$ 道开始。以后每计算出一道中间工序，都要进行检查。检查方法与计算的中间工序半成品形状有关。第一种情况，中间某工序为圆筒形，判断与计算的方法同圆筒形件多次拉深，即用首次极限拉深系数检查，在此不再重复。第二种情况，当计算出某工序为椭圆形时，就得用图 3.4-66 给出的椭圆形成形极限判断。首先用式（3.4-52）求出长轴处展开毛坯的半径 R_{K0}

$$R_{K0}=\sqrt{R_{aK}^2+2R_{aK}h_K-0.86r_{pK}\ (R_{aK}+0.16r_{pK})} \quad (3.4\text{-}52)$$

式中，h_K 为该工序椭圆筒高度；r_{pK} 为该工序椭圆筒底角半径。

再用式（3.4-53）求出椭圆筒第一次极限拉深系数 m_T

$$m_T=K\sqrt{\frac{b_K}{a_K}}\,m_Y \quad (3.4\text{-}53)$$

式中，K 为与材料性能有关的系数，一般取 $K=1.04\sim1.08$；a_K 为该工序椭圆的长半轴；b_K 为该工序椭圆的短半轴；m_y 为相同材料圆筒形件第一次极限拉深系数。

如果 $m_K=\dfrac{R_{aK}}{R_{K0}}\geqslant m_T$ 时，则该工序可用平板毛坯进行拉深，即第一道工序。如 $m_K=\dfrac{R_{aK}}{R_{K0}}<m_T$ 时，则不能用平板毛坯进行第一道拉深，应继续进行前一工序的计算。

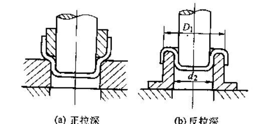
至于第一次拉深用的平板毛坯，第一种情况当然是圆形平板毛坯；第二种情况为椭圆形，可用图 3.4-65 所示的 K 值法确定椭圆形平板毛坯的形状和尺寸。

7 其他拉深方法

7.1 反拉深

(1) 反拉深特点

反拉深就是将中间毛坯按与以前相反方向进行的拉深。反拉深把中间毛坯内壁外翻。如图 3.4-70 所示为正拉深与反拉深的比较。



(a) 正拉深 (b) 反拉深

图 3.4-70 正拉深与反拉深的比较

反拉深具有如下特点：

1) 反拉深材料流动方向与正拉深相反，有利于相互抵消拉深形成的残余应力。

2) 反拉深时，材料弯曲与反弯曲次数较少，冷作硬化也少，有利于成形。如图 3.4-70a 所示的正拉深中，位于压边圈圆角部分的材料，流向凹模圆角时，内圆弧成了外圆弧。而图 3.4-70b 所示的反拉深中，位于内圆弧处的材料在流动过程中始终处于内圆弧部分。

3) 反拉深将原有的外表面内翻，原有外表面拉深时的划痕不影响外观。

4) 反拉深坯料与凹模接触面较正拉深大，材料流动阻力也大，因而一般可不用压边圈。但坯料外缘流经凹模入口圆角时，阻力已明显减少，故大直径薄料拉深仍需压料，以免起皱。

5) 反拉深的拉深力可比正拉深力大 20%左右。

6) 反拉深坯料内径 D_1 套在凹模外面，工件外径 d_2 通过凹模内孔。故凹模壁厚不能超过 1/2 (D_1-d_2)。即反拉深的拉深系数不能太大，太大则凹模壁厚过薄，强度不足。另外，凹模圆角半径不能大于 1/4 (D_1-d_2)。

(2) 反拉深应用举例

图 3.4-71 所示为一些典型的反拉深零件。在一个压力机行程内先后进行正反拉深，可以大大减小拉深系数。图 3.4-72 所示为在双动压力机上进行的正反拉深。图 3.4-73 所示为在单动压力机上进行的正反拉深。

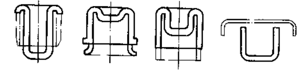
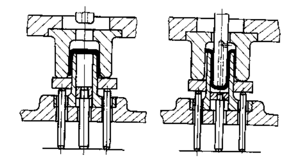


图 3.4-71 反拉深例子



(a) 先正拉深 (b) 后反拉深

图 3.4-72 双动压力机上进行的正反拉深

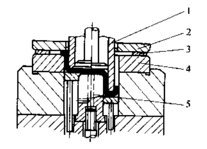


图 3.4-73 单动压力机上进行的正反拉深
1—凸凹模；2—压边圈；3—限位圈；
4—凹模（正拉深）；5—凸模（反拉深）

7.2 带料连续拉深

连续拉深工艺主要用于小零件的大量生产，拉深直径一般不超过 50 mm，材料厚度大多在 0.5~2.0 mm 范围内。

在带料上连续拉深采用两种方法，一种是在没有切口或切槽的整体带料上拉深，另一种是在有切口或切槽的带料上拉深。后一种方法的应用面比前一种更普遍，两种方法的工艺计算并不相同。

(1) 整体带料的连续拉深

整体带料连续拉深用料较省，但材料流动较困难，带料边缘容易起皱。

1) 展开尺寸计算。展开尺寸的计算，和带凸缘拉深件展开尺寸的计算方法相同。在带料上用连续拉深工艺生产的无凸缘拉深件，其修边余量应在带料平面上考虑（见表 3.4-41），而不应沿零件高度方向考虑。

表 3.4-41 连续拉深件的修边余量

mm

简图	带凸缘件直径 d_f	无凸缘件直径 d	修边余量 δ
带凸缘件（d_f，δ）　无凸缘件（d，δ）	≤25		1.0~1.5
	>25~50		1.5~2.5



连续拉深时，带料长度明显缩短，宽度明显变窄。首次拉深件的表面积，应比成品零件（包括修边余量）的表面积大10%～15%。在以后各次拉深中，随着中间工序毛坯直径的逐渐减小，部分材料又逐渐转到平的凸缘或带料平面上来。

$$F_1 = (1.1 \sim 1.15)\ F_0 \qquad (3.4\text{-}54)$$

或 $$d_j = \sqrt{1.1 \sim 1.15}\, d_0 = (1.05 \sim 1.075)\ d_0 \qquad (3.4\text{-}55)$$

式中，F_0 为包括修边余量在内的工件表面积；F_1 为首次拉深件的表面积；d_0 为包括修边余量在内的工件展开直径；d_j 为假想展开直径或首次拉深件展开直径。

2）料宽和步距。料宽和步距（如图3.4-74），按下式确定：

$$B = d_j \qquad (3.4\text{-}56)$$

$$p = (0.8 \sim 0.9)\ d_j \qquad (3.4\text{-}57)$$

式中，B 为料宽（利用侧刃切边时另放切边余量）；p 为步距；d_j 为假想展开直径，见式（3.4-55）。

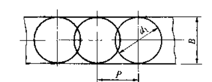


图 3.4-74　整体带料的连续拉深

步距之所以减小是因为材料在长度方向的明显收缩，但步距不应小于首次拉深件的凸缘直径。

3）拉深工艺

① 拉深系数

首次拉深系数 $$m_1 = \frac{d_1}{d_j} \qquad (3.4\text{-}58)$$

二次拉深系数 $$m_2 = \frac{d_2}{d_1} \qquad (3.4\text{-}59)$$

第 n 次拉深系数 $$m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}} \qquad (3.4\text{-}60)$$

式中，m_1 为首次拉深系数；d_1 为首次拉深直径；d_j 为假想展开直径，见式（3.4-55）；m_2 为二次拉深系数；d_2 为二次拉深直径；m_n 为第 n 次拉深系数；d_n 为第 n 次拉深直径；d_{n-1} 为第（$n-1$）次拉深直径。

在整体带料上进行连续拉深，为了避免拉断或开裂，宜采用较大的拉深系数。

② 高度计算。计算各工序毛坯高度前，应首先计算各工序毛坯的表面积 F_1、F_2、$F_3 \cdots F_n$。F_1 见式（3.4-54）。

$$F_2 = \beta F_1$$
$$F_3 = \beta^2 F_1$$
$$F_4 = \beta^2 F_1$$
$$\cdots\cdots$$
$$F_n = \beta^{n-1} F_1$$

以上各式中，F_2、$F_3 \cdots F_n$ 分别为第二道、第三道、…、第 n 道拉深工序零件表面积，β 为系数，一般为0.96～0.98。

已知中间工序零件表面积后，可按复杂旋转体曲面零件拉深时求展开尺寸的方法，求解高度 h。

计算的高度只能作为设计参考，精确的高度要通过试模校出。

③ 圆角半径。连续拉深时，凹模的圆角半径 r_d 和凸模的圆角半径 r_p 按以下方法计算。

a）首次拉深　凸模圆角半径 r_{p1} 为料厚的（4～6）倍，即

$$r_{p1} = (4 \sim 6)\ t \qquad (3.4\text{-}61)$$

凹模圆角半径为凸模的60～90%，即

$$r_{d1} = (0.6 \sim 0.9)\ r_{p1} \qquad (3.4\text{-}62)$$

b）中间拉深工序的凸、凹模圆角半径均匀递减至工件需要的圆角半径值。有时也可有几道工序圆角半径相同。

c）末次拉深凸、凹模的圆角半径均为前道工序圆角半径的70%～80%，即

$$r_{pn} = (0.7 \sim 0.8)\ r_{p(n-1)}，但 \not< 2t \qquad (3.4\text{-}63)$$

$$r_{dn} = (0.7 \sim 0.8)\ r_{d(n-1)}，但 \not< t \qquad (3.4\text{-}64)$$

如工件要求 $r_{pn} < 2t$ 或 $r_{dn} < t$，应采用整形工序，每一整形工序允许减小圆角半径50%。

4）计算举例。制订图3.4-75所示的拉深件，在厚0.4 mm的整体黄铜带料上连续拉出的拉深程序。

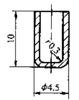


图 3.4-75　在整体带料上生产的连续拉深件

计算步骤如下。

① 按表3.4-41，每边放修边余量 $\delta = 1.25$ mm，得凸缘直径

$$d_f = 2 \times 1.25 + 4.5\ \text{mm} = 7\ \text{mm}$$

② 按带凸缘筒形件拉深毛坯尺寸展开计算公式计算放修边余量后工件的（图3.4-76）展开直径 d_0，即

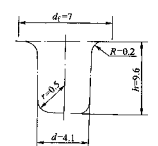


图 3.4-76　求展开直径 d_0

$$d_0 = \sqrt{d_f^2 + 4dH - 1.72dR + 0.56R^2 - 1.72dr - 0.56r^2}$$
$$= \sqrt{7^2 + 4 \times 4.1 \times 9.6 - 1.72 \times 4.1 \times 0.2 + 0.56 \times 0.2^2 - 1.72 \times 4.1 \times 0.5 - 0.56 \times 0.5^2}\ \text{mm}$$
$$= 14.2\ \text{mm}$$

③ 求假想展开直径 d_j 及相应表面积 F_1

由式（3.4-55）　$d_j = 1.05 d_0 = 1.05 \times 14.2\ \text{mm} = 15\ \text{mm}$

$$F_1 = \frac{\pi}{4} d_j^2 = \frac{\pi}{4} \times 15^2\ \text{mm} = 177\ \text{mm}^2$$

④ 求料宽及步距

由式（3.4-56）　$B = d_j = 15$ mm

由式（3.4-57）　$P = 0.8 d_j = 0.8 \times 15\ \text{mm} = 12\ \text{mm}$（实际取12.2 mm，略大于首次拉深凸缘直径）

⑤ 首次拉深计算

$100t/d_j = 100 \times 0.4/15 = 2.7$

取　$m_1 = 0.56$，$d_1 = m_1 d_j = 0.56 \times 15\ \text{mm} = 8.4\ \text{mm}$

凸模圆角半径 $r_{p1}=4t=4\times0.4\ \text{mm}=1.6\ \text{mm}$

凹模圆角半径 $r_{d1}=0.9r_{p1}=0.9\times1.6\ \text{mm}=1.44\ \text{mm}\approx1.5\ \text{mm}$

$d_f=8.4\ \text{mm}+0.4+2\times1.5\ \text{mm}=11.8\ \text{mm}$

由式（3.4-23）

$$h_1=0.32\frac{F_1}{d_1}-0.25\frac{d_f^2}{d_1}+0.43\left[\left(r_{d1}+\frac{t}{2}\right)+\left(r_{p1}+\frac{t}{2}\right)\right]+0.14\frac{\left(r_{p1}+\frac{t}{2}\right)^2-\left(r_{d1}+\frac{t}{2}\right)^2}{d_1}$$

$$=0.32\times\frac{177}{8.4}\ \text{mm}-0.25\times\frac{11.8^2}{8.4}\ \text{mm}+0.43[1.7+1.8]\ \text{mm}+0.14\times\frac{1.8^2-1.7^2}{8.4}$$

$=4.1\ \text{mm}$

在实际生产中，首次拉深件侧壁稍带倾斜，其尺寸如图3.4-77所示。

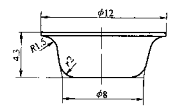


图 3.4-77 实际首次拉深件

⑥ 二次拉深计算：取 $m_2=0.9$，$d_2=m_2d_1=0.9\times8.4\ \text{mm}=7.56\ \text{mm}\approx7.6\ \text{mm}$（实际为 7.6 mm）

凸模圆角半径 1.4 mm（按中心线 $r_{p2}=1.6\ \text{mm}$）

凹模圆角半径 1.2 mm（按中心线 $r_{d2}=1.4\ \text{mm}$）

$$F_2=0.97F_1=0.97\times177\ \text{mm}^2=172\ \text{mm}^2$$

$$d_f=(7.6+2\times1.4)\ \text{mm}=10.4\ \text{mm}$$

由式（3.4-24）

$$h_2=0.32\frac{F_2}{d_2}-0.25\frac{d_f^2}{d_2}+0.43(r_{d2}+r_{p2})+0.14\frac{r_{p2}^2-r_{d2}^2}{d^2}$$

$$=0.32\frac{172}{7.6}\ \text{mm}-0.25\frac{10.4^2}{7.6}\ \text{mm}+0.43(1.4+1.6)\ \text{mm}+0.14\times\frac{1.6^2-1.4^2}{7.6}\ \text{mm}=5.0\ \text{mm}$$

⑦ 三次拉深计算：取 $m_3=0.9$，$d_3=m_3d_2=0.9\times7.6=6.84\approx6.8\ \text{mm}$

凸模圆角半径 1.2 mm（按中心线 $r_{p3}=1.4\ \text{mm}$）

凹模圆角半径 1.0 mm（按中心线 $r_{d3}=1.2\ \text{mm}$）

$$F_3=0.97^2F_1=0.97^2\times177\ \text{mm}^2=166.5\ \text{mm}^2$$

$$d_f=(6.8+2\times1.2)\ \text{mm}=9.2\ \text{mm}$$

由式（3.4-24）

$$h_3=0.32\times\frac{166.5}{6.8}\ \text{mm}-0.25\times\frac{9.2^2}{6.8}\ \text{mm}+0.43(1.4+1.2)\ \text{mm}+0.14\times\frac{1.4^2-1.2^2}{6.8}\ \text{mm}=5.8\ \text{mm}$$

⑥ 四次拉深计算：取 $m_4=0.9$，$d_4=m_4d_3=0.9\times6.8\ \text{mm}=6.12\ \text{mm}\approx6.1\ \text{mm}$（实际为 6.1 mm）

凸、凹模圆角半径同三次拉深

$$F_4=0.97^5F_1=0.97^3\times177\ \text{mm}^2=161.5\ \text{mm}^2$$

$$d_f=6.1+2\times1.2\ \text{mm}=8.5\ \text{mm}$$

$$h_4=[0.32\times\frac{161.5}{6.1}-0.25\times\frac{8.5^2}{6.1}+0.43\ (1.4+1.2)\ +0.14\times\frac{1.4^2-1.2^2}{6.1}]\ \text{mm}=6.6\ \text{mm}$$

（实际为 6.3 mm）

⑨ 五次拉深计算：取 $m_5=0.9$，$d_5=m_5d_4=0.9\times6.1=5.49\approx5.5\ \text{mm}$（实际为 5.4 mm）

凸模圆角半径 1.0 mm（按中心线 $r_{p5}=1.2\ \text{mm}$）

凹模圆角半径 1.0 mm（按中心线 $r_{d5}=1.2\ \text{mm}$）

$$F_5=0.97^4\times F_1=0.97^4\times177\ \text{mm}^2=156.7\ \text{mm}^2$$

$$d_f=(5.5+2\times1.2)\ \text{mm}=7.9\ \text{mm}$$

$$h_5=0.32\times\frac{156.7}{5.5}\ \text{mm}-0.25\times\frac{7.9^2}{5.5}\ \text{mm}+0.43(1.2\times2)\ \text{mm}=7.3\ \text{mm}$$

（实际为 7.2 mm）

⑩ 六次拉深计算：取 $m_6=0.9$，$d_6=m_6d_5=0.9\times5.5=4.95\approx5\ \text{mm}$（实际为 4.8 mm）

凸模圆角半径 0.8 mm（按中心线 $r_{p6}=1.0\ \text{mm}$）

凹模圆角半径 0.6 mm（按中心线 $r_{d6}=1.0\ \text{mm}$）

$$F_6=0.97^5\times F_1=0.97^5\times177\ \text{mm}^2=152\ \text{mm}^2$$

$$d_f=(5+2\times1.0)\ \text{mm}=7\ \text{mm}$$

$$h_6=0.32\times\frac{152}{5}-0.25\times\frac{7^2}{5}+0.43\ (1\times2)\ \text{mm}=8.1\ \text{mm}$$

（实际为 8.2 mm）

⑪ 七次拉深计算

取 $m_7=0.92$，$d_7=m_7d_6=0.92\times5\ \text{mm}=4.6\ \text{mm}$（实际为 4.5 mm）

凸模圆角半径 0.6 mm（按中心线 $r_{p7}=0.8\ \text{mm}$）

凹模圆角半径 0.6 mm（按中心线 $r_{d7}=0.8\ \text{mm}$）

$$F_7=0.97^4\times F_1=0.97^6\times177\ \text{mm}^2=147.5\ \text{mm}^2$$

$$d_f=(4.6+2\times0.8)\ \text{mm}=6.2\ \text{mm}$$

$$h_7=[0.32\times\frac{147.5}{4.6}-0.25\times\frac{6.2^2}{4.6}+0.43(0.8\times2)]\ \text{mm}=8.9\ \text{mm}$$

（实际为 9.0 mm）

⑫ 八次拉深计算

取 $m_8=0.93$，$d_8=m_8d_7=0.93\times4.6=4.28\approx4.3\ \text{mm}$（实际为 4.3 mm）

凸模圆角半径 0.3 mm（按中心线 $r_{p8}=0.5\ \text{mm}$）

凹模圆角半径 0.3 mm（按中心线 $r_{d8}=0.5\ \text{mm}$）

$$F_8=0.97^7\times F_1=0.97^7\times177\ \text{mm}^2=143\ \text{mm}^2$$

$$d_f=(4.3+2\times0.5)\ \text{mm}=5.3\ \text{mm}$$

$$h_8=[0.32\times\frac{143}{4.3}-0.25\times\frac{5.3^2}{4.3}+0.43(0.5\times2)]\ \text{mm}=9.5\ \text{mm}$$

（实际为 9.4 mm）

⑬ 末次拉深计算

$$m_9=\frac{4.1}{4.3}=0.953$$

凸模圆角半径 0.3 mm（按中心线 $r_{p9}=0.5\ \text{mm}$）

凹模圆角半径 0.3 mm（按中心线 $r_{d9}=0.3\ \text{mm}$）

$$F_9=0.97^8\times F_1=0.97^4\times177\ \text{mm}^2=139\ \text{mm}^2$$

$$d_f=(4.1+2\times0.3)\ \text{mm}=4.7\ \text{mm}$$

$$h_9=0.32\times\frac{F_9}{4.1}-0.25\times\frac{4.7^2}{4.1}\ \text{mm}+0.43(0.5+0.3)\ \text{mm}+0.14\times\frac{0.5^2-0.3^2}{4.1}\ \text{mm}=9.6\ \text{mm}$$

图 3.4-78 所示为连续拉深此零件的排样。

（2）有切口（槽）带料的连续拉深

1）展开尺寸。计算展开尺寸时，放修边余量的方法和



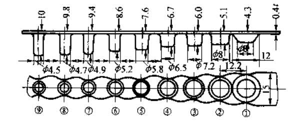


图 3.4-78 整体带料的连续拉深

整体带料连续拉深相同，修边余量也按表 3.4-41 选取。

首次拉深件的表面积，与放修边余量后的拉深件表面积相等或略大。这是因为在有切口（槽）带料的连续拉深时，凸缘受到的整平力较大，拉深过程中回到凸缘上去的材料比整体带料连续拉深时少得多。

$$F_1 = (1 \sim 1.05)\ F_0 \tag{3.4-65}$$

或

$$d_j = \sqrt{(1 \sim 1.05)}\, d_0 = (1 \sim 1.025)\ d_0 \tag{3.4-66}$$

式中，F_0 为包括修边余量在内的工件表面积；F_1 为首次拉深件的表面积；d_0 为包括修边余量在内的工件展开直径；d_j 为首次拉深件展开直径。

2）切口（槽）的主要形式

① 单圈切口。图 3.4-79 所示的单圈切口，适用于拉深较薄的材料（$t \leqslant 1$ mm），工件直径大于 5 mm。这种切口的主要缺点在于带料两侧在拉深过程中因收缩而拱起，不便于送料。但首次拉深时起皱情况比整体带料要好些。

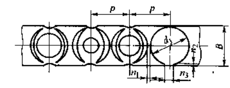


图 3.4-79 单圈切口

单圈切口料宽按下式计算：

$$B = d_j + 2n_2 \tag{3.4-67}$$

式中，B 为材料宽度；d_j 为首次拉深展开直径，见式（3.4-66）；n_2 为侧面搭边，见表 3.4-42。

步距按式（3.4-68）计算：

$$p = d_j + n_1 \tag{3.4-68}$$

式中，p 为步距；n_1 为切口间搭边，见表 3.4-42。

切口相连处宽度 n_3，见表 3.4-42。

表 3.4-42 n_1、n_2 和 n_3 的数值 mm

首次拉深展开直径 d_j	n_1	n_2	n_3
<10	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0
10~30	1.5~2.0	2.0~2.5	2.0~4.0
>30	2.0~2.5	2.5~3.0	4.0~5.0

② 工形切槽。图 3.4-80 所示的工形切槽，克服了单圈切口的缺点，但拉深过程中带料会缩小，故仍不能使用导正销定位。

带料尺寸按以下各式计算：

$$A = Kd_j \tag{3.4-69}$$

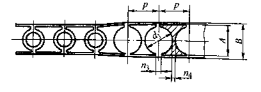


图 3.4-80 工形切槽

式中，A 为切槽宽度；d_j 为首次拉深展开直径，见式（3.4-66）；K 为系数，见表 3.4-43。

$$B = A + 2n_2 \tag{3.4-70}$$

式中，B 为材料宽度；A 为按式（3.4-69）计算；n_2 为见表 3.4-42。

$$p = d_j + n_4 \tag{3.4-71}$$

式中，p 为步距；n_4 为见表 3.4-43，一般不小于 1 mm。

表 3.4-43 n_4 和 K 数值

材料厚度 t/mm	K	n_4（一般不小于 1 mm）
<1.0	1.05~1.03	$3t$
1.0~2.0	1.03~1.0	$2t$

切槽相连处宽度 n_3，见表 3.4-42。

③ 双圈切口。图 3.4-81 所示的双圈切口，带料宽度和步距在拉深过程中都不改变，因而可用导正销定位。这种形式的切口用料较多。在双圈切开后，要用压平工序把切出的垫圈形材料重新压入带料内。

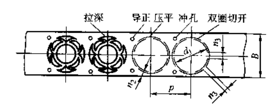


图 3.4-81 双圈切口

带料宽度和步距按以下两式计算：

$$B = d_j + 4n_2 \tag{3.4-72}$$

$$p = d_j + n_1 + 2n_2 \tag{3.4-73}$$

式中，d_j 为首次拉深展开直径；

n_1、n_2 以及切口相连处宽度 n_3，见表 3.4-42。

3）拉深工艺

① 拉深系数。拉深系数的计算，仍可用式（3.4-58）~（3.4-60）。只是式（3.4-58）中的 d_j，要按式（3.4-66）计算。

采用切口或切槽后，拉深系数的具体数值基本上和带凸缘筒形件相等。

切口或切槽减少了材料流动时的牵制，因而拉深系数比整体带料的相应数值减少。但是总拉深系数 m，即工件直径和首次拉深展开直径的比值，仍有一定的限制，一般不宜比表 3.4-44 所列值更小。表中提到的推件装置，是指利用压料装置将工件推入拉深凹模的装置。

② 高度计算。有切口（槽）连续拉深时，工件的高度计算，除了下述两点外，都和整体带料连续拉深的相同。这两点是：F_1 见式（3.4-65）；β 一般在 0.99~1.0 之间。

表 3.4-44 总拉深系数 m

材料	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%	总拉深系数 m		
			不带推件装置		带推件装置
			料厚 $t \leq 1.2$ mm	料厚 $t = 1.2 \sim 2$ mm	
钢 08F	300 ~ 400	28 ~ 40	0.40	0.32	0.16
黄铜 H62、H68	300 ~ 400	28 ~ 40	0.35	0.29	0.2 ~ 0.24
软铝	80 ~ 110	22 ~ 25	0.38	0.30	0.18

③ 圆角半径。见整体带料连续拉深。

4) 计算举例。制订图 3.4-82 所示连续拉深件的拉深程序。

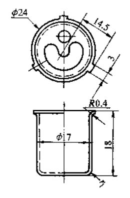


图 3.4-82 连续拉深件（$t = 0.5$ mm）

计算步骤如下。

① 放修边余量 0.75 mm，$d_f = 2 \times (14.5 + 0.75)$ mm = 30.5 mm

② 计算放修边余量后工件的展开直径 d_0，尺寸从工件剖面中心线选取。

$d_f = 30.5$ mm，$d = 16.5$ mm

$h = 17.5$ mm　$R = 0.65$ mm　$r = 0.75$ mm

$$d_0 = \sqrt{d_f^2 + 4dh - 1.72dR + 0.56R^2 - 1.72dr - 0.56r^2}$$

$$= \sqrt{30.5^2 + 4 \times 16.5 \times 17.5 - 1.72 \times 16.5\ (0.65 + 0.75)\ \text{mm} + 0.56\ (0.65^2 - 0.75^2)\ \text{mm}}$$

$$= \sqrt{2\,046}\ \text{mm} = 45.2\ \text{mm}$$

③ 求首次拉深展开直径 d_j 及相应表面积 F_1：由式 (3.4-66)

$$d_j = d_0 = 45.2\ \text{mm}\ (实际取\ 45\ \text{mm})$$

$$F_1 = \frac{\pi}{4} d_j^2 = \frac{\pi}{4} \times 45^2\ \text{mm}^2 = 1\,590\ \text{mm}^2$$

④ 求带料有关尺寸：带料用工形切槽

由式 (3.4-69)

$A = Kd_j = 1.05 \times 45$ mm = 47.3 mm（实际取 48 mm）

由式 (3.4-70)

$$B = A + 2n_2 = 48\ \text{mm} + 2 \times 3\ \text{mm} = 54\ \text{mm}$$

由式 (3.4-71)

$p = d_j + n_4 = (45 + 3 \times 0.5)$ mm = 46.5 mm（实际取 47 mm）

由表 3.4-42，切槽相连处宽度 $n_3 = 4.5$ mm

⑤ 首次拉深计算

$$100 \times t/d_j = 100 \times 0.5/45 = 1.1$$

暂取　$m_1 = 0.55$，$d_1 = m_1 d_j = 0.55 \times 45$ mm = 24.8 mm

$d_f/d_1 = 30.5/24.8 = 1.23$。在坯料相对厚度为 1.1，凸缘相对直径为 1.2 时，$m_1 = 0.55$ 是允许的。

实际取 $d_1 = 25.5$ mm（剖面中心线尺寸）

凸模圆角半径 = $6t = 6 \times 0.5$ mm = 3 mm（实际取 5.5 mm）

凹模圆角半径 = 3×0.9 mm = 2.7 mm（实际取 5 mm）

按剖面中心线 $r_{d1} = 5.25$ mm，$r_{p1} = 5.75$ mm

为了求首次拉深件高度，需分别计算各段表面积（图 3.4-83）。方法是按表 3.4-7 有关公式乘以 $\frac{\pi}{4}$。

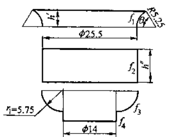


图 3.4-83 首次拉深表面积划分

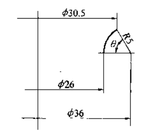


图 3.4-84 求角度 θ

由图 3.4-84

$$5\ (1 - \cos\theta) \times 2 = 30.5 - 26$$

$$\theta = 56.6°$$

$$h' = 5.25\sin 56.6°\ \text{mm}^2 = 4.39\ \text{mm}$$

$$弧长 = 5.25 \times 56.6° \times 3.14/180°\ \text{mm}^2 = 5.2\ \text{mm}$$

$$f_1 = \pi\ (36 \times 5.2 - 2 \times 5.25 \times 4.39)\ \text{mm}^2 = 141\pi\ \text{mm}^2$$

$$f_2 = \pi \times 25.5h''\ \text{mm}^2 = 25.5h''\pi\ \text{mm}^2$$

$$f_3 = \frac{\pi \times 5.75}{2}\ (\pi \times 14 + 4 \times 5.75)\ \text{mm}^2 = 192.5\pi\ \text{mm}^2$$

$$f_4 = \frac{\pi}{4} \times 14^2\ \text{mm}^2 = 49\pi\ \text{mm}^2$$

$$F_1 = 1\,590\ \text{mm}^2 = 141\pi\ \text{mm}^2 + 25.5h''\pi + 192.5\pi\ \text{mm}^2 + 49\pi\ \text{mm}^2$$

解上式得　$h'' = 4.8$ mm

按剖面中心线计算首次拉深件总高度为

$h_1 = h'_1 + h'' + r_{p1} = (4.39 + 4.8 + 5.75)$ mm = 14.9 mm（实际为 15 mm）

⑥ 二次拉深计算　取 $m_2 = 0.76$　$d_2 = m_2 d_1 = 0.76 \times 25.5$ mm = 19.4 mm（实际为 19.5 mm）

凸模圆角半径为 3.5 mm，凹模圆角半径为 3 mm。

按剖面中心线 $r_{p2}=3.75$ mm　$r_{d2}=3.25$ mm

由式（3.4-24）

$$h_2=0.32\frac{F_2}{d_2}-0.25\frac{d_f^2}{d_2}+0.43\ (r_{d2}+r_{p2})\ +0.14\frac{r_{p2}^2-r_{d2}^2}{d_2}$$

$$=\left[0.32\frac{1\,590}{19.5}-0.25\frac{30.5^2}{19.5}+0.43\ (3.25+3.75)\right.$$

$$\left.+0.14\times\frac{3.75^2-3.25^2}{19.5}\right]\ \text{mm}$$

$$=17.2\ \text{mm}$$

（实际为 18 mm）

⑦ 三次拉深计算：取 $m_3=0.82$（因圆角半径减小较多，故拉深系数偏大选取）

$d_3=m_3d_2=0.82\times19.5$ mm $=16$ mm，此值已小于工件直径，故实际取 16.5 mm。

凸模圆角半径为 1.2 mm（实际取 1.1 mm），凹模圆角半径为 1.2 mm。

按剖面中心线 $r_{p3}=r_{d3}=1.45$ mm

由式（3.4-24）

$$h_3=0.32\frac{F_3}{d_3}-0.25\frac{d_f^2}{d_3}+0.43\ (r_{d3}+r_{p3})\ +0.14\frac{r_{p3}^2-r_{d3}^2}{d_3}$$

$$=\left(0.32\times\frac{1\,590}{16.5}-0.25\times\frac{30.5^2}{16.5}+0.43\times1.45\times2\right)\ \text{mm}$$

$=18.1$ mm（实际为 18.5 mm）

⑧ 末次拉深计算　直径保持不变 $d_4=d_3=16.5$ mm，圆角半径继续减小（整形）。

凸模圆角半径为 0.5 mm，凹模圆角半径为 0.4 mm。

按剖面中心线 $r_{p4}=0.75$ mm　$r_{d4}=0.65$ mm

由式（3.4-24）

$$h_4=0.32\frac{F_4}{d_4}-0.25\frac{d_f^2}{d_4}+0.43(r_{d4}+r_{p4})+0.14\frac{r_{p4}^2-r_{d4}^2}{d_4}$$

$$=\left(0.32\times\frac{1\,590}{16.5}-0.25\times\frac{30.5^2}{16.5}+0.43(0.65+0.75)\right.$$

$$\left.+0.14\times\frac{0.75^2-0.65^2}{16.5}\right)\ \text{mm}$$

$=17.4$ mm（实际为 17.5 mm）

连续拉深的排样见图 3.4-85。

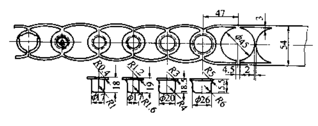


图 3.4-85　连续拉深排样

7.3　变薄拉深

变薄拉深不同于一般拉深。一般拉深时，毛坯材料的厚度基本上是不变的，而变薄拉深时，其主要的变形反映在材料厚度的变化，而毛坯的直径变化很小。图 3.4-86 所示为变薄拉深示意图。

由于变薄拉深凸模与凹模的间隙 C 小于毛坯的壁厚，因此经过拉深，坯料壁部变薄而高度增加。变薄拉深主要用于制造底厚而壁薄、高度很大的圆筒形零件，或用来制造薄壁管坯，例如：弹壳、雷管套、高压容器、高压钢等。

（1）变薄拉深的变形特点

1）变薄拉深时，毛坯变形区是处于凹模模孔内锥形部分范围的金属，而传力区是从凹模内被拉出厚度为 t_2 的侧壁部分和底部。变形区的金属处于轴向受拉和径向、切向受压的三向应力状态和径向受压缩、轴向伸长的应变状态，见图 3.4-86 所示。

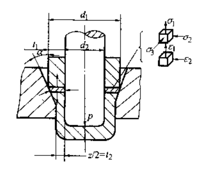


图 3.4-86　变薄拉深

2）由于毛坯的变形是处于较大的均匀压应力之下，所以材料的变形较大，金属的晶粒细密，强度增加。

3）变薄拉深的工件质量高，壁厚较均匀，壁厚差在 ±0.01 mm 以内，表面粗糙度数值可达 $R_a0.4$ 以内。

4）没有起皱问题，故不需要压边装置。

5）变薄拉深件的残余应力较大，常需用低温回火消除，以免储存时自行开裂。

（2）变薄拉深的变形程度

变薄拉深时的最大变形程度受传力区强度的限制，不能过大，一般常用变薄系数 φ 表示：

$$\varphi_n=\frac{A_n}{A_{n-1}}\tag{3.4-74}$$

式中，A_n、A_{n-1}为 n 次及（$n-1$）次变薄拉深后工件的横断面积。

对于内径不变的变薄拉深也可用下式表示：

$$\varphi_n=\frac{t_n}{t_{n-1}}\tag{3.4-75}$$

式中，t_n、t_{n-1}为 n 次及（$n-1$）次拉深后的壁厚。

常用材料的极限变薄系数见表 3.4-45。

表 3.4-45　变薄系数 φ 的极限值

材料	首次变薄系数 φ_1	中间各次变薄系数 φ	末次变薄系数 φ_n
铜、黄铜	0.45～0.55	0.58～0.65	0.65～0.73
铝	0.50～0.60	0.62～0.68	0.72～0.77
低碳钢、拉深钢板	0.52～0.63	0.63～0.72	0.75～0.77
中碳钢	0.70～0.75	0.78～0.82	0.85～0.90
不锈钢	0.65～0.70	0.70～0.75	0.75～0.80

（3）变薄拉深的工艺计算

1）毛坯尺寸计算。变薄拉深大多采用一般拉深方法所获得的筒形毛坯。由于拉深过程中壁厚要改变，因此，毛坯尺寸的计算应按变形前后材料体积不变原则确定。

毛坯体积按下式确定：

$$V_0=kV_1\tag{3.4-76}$$

式中，V_0 为毛坯的体积，mm³；V_1 为工件的体积，mm³；k 为考虑修边余量所加的系数，$k=1.1\sim1.2$。

按上式求出毛坯的直径为：

$$d_0=1.13\sqrt{\frac{V_0}{t_0}}=1.13\sqrt{\frac{kV_1}{t_0}}\tag{3.4-77}$$

式中，d_0 为毛坯的直径，mm；t_0 为毛坯的厚度，mm。

2）各道工序的壁厚

$$t_1 = t_0\varphi_1$$

$$t_2 = t_1\varphi_2$$

$$\cdots$$

$$t_n = t_{n-1}\varphi_n \quad (3.4\text{-}78)$$

式中，t_0 为毛坯的壁厚，mm；$t_1 \cdots t_{n-1}$ 为中间工序件的侧面壁厚，mm；t_n 为工件的侧面壁厚，mm。

3）各道工序的直径。各道工序的直径基本上是不变的，但为了使凸模能顺利地插入中间工序件，其直径应比中间工序件内径小1%～3%，而最后一道工序的凸模直径即为工件内径。因此各道工序直径需要从最后一道向前计算：

$$D_{n-1} = (1.01 \sim 1.03)\ D_n$$

$$D_{n-2} = (1.01 \sim 1.03)\ D_{n-1}$$

$$\cdots$$

$$D_1 = (1.01 \sim 1.03)\ D_2 \quad (3.4\text{-}79)$$

式中，D_n 为工件内径，mm；D_1、$D_2 \cdots D_{n-1}$ 为各工序件内径，mm。

4）各道工序的坯料高度。按照体积相等的原则，各道工序的高度为：

$$h_n = \frac{t_0\ (d_0^2 - d_n^2)}{2t_n\ (d_n + D_n)} \quad (3.4\text{-}80)$$

式中，t_0 为毛坯厚度，mm；d_0 为毛坯直径，mm；d_n 为该道工序的工件外径，mm；D_n 为该道工序的工件内径，mm；t_n 为该道工序的工件壁厚，mm；h_n 为该道工序的工件高度，（不包括底部厚度 t_0）。

（4）变薄拉深模具的结构及其工作部分参数

1）凹模结构。图3.4-87所示为凹模结构。变薄拉深时，凹模结构对变形过程和变形抗力影响很大，其中主要是凹模锥角和工作带高度。

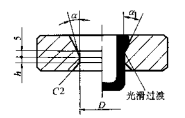


图3.4-87 凹模结构

① 凹模锥角

$\alpha = 7° \sim 10°$，过大，变形困难。

$\alpha_1 = 2\alpha$

② 工作带高度。工作带高度（h）不宜太大，太大增加摩擦阻力，太小则易磨损，一般可按表3.4-46选取。

表3.4-46 工作带高度

D/mm	<10	10～20	20～30	30～50	>50
h/mm	0.9	1.0	1.5～2.0	2.5～3.0	3.0～4.0

2）凸模结构。凸模结构如图3.4-88所示。其特点如下。

① 为便于脱模，凸模有一定的锥度，一般取斜度 $\beta = 1°$。

② 凸模工作部分长度（L）大于工件长度（加上修边余量）。

③ 为便于工件从凸模上卸下，凸模开有出气孔，其直径 $D = (1/3 \sim 1/6)\ d$。在变薄拉深1Cr18Ni9Ti等不锈钢材料时，因工件抱合力较大，此时不宜用刮件环卸件，而在凸模上加一油嘴借液压卸出工件。

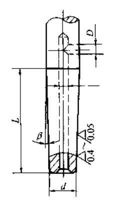


图3.4-88 凸模结构

对于采用液压设备拉深较长工件时，常采用浮动凸模形式，便于与凹模自动找正。

在大量生产中常把两次或三次拉深的凹模置于一个模架上，这样就可以在压力机的一次行程中完成两次或三次拉深，有利于提高生产率。图3.4-89所示为生产中常采用的通用模架。

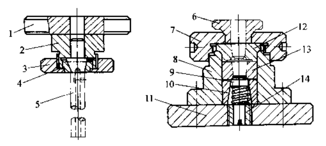


图3.4-89 变薄拉深通用模架

1—上模板；2—凸模固定板；3—紧固环；4—锥面套；5—凸模；6—校模圈；7—紧固圈；8—下模座；9—刮件环；10—锥面套；11—下模板；12—定位圈；13—凹模；14—螺塞

由图可见，下模采用紧固圈7将凹模13、定位圈12紧固在下模座8内，凸模也以紧固环3及锥面套4紧固在上模板1上。不同工序的变薄拉深，只需松开紧固圈7和紧固环3，更换凸模、凹模和定位圈即可。该模没有导向装置，靠压力机本身的导向精度保证。为了装模、对模方便，可采用校模圈6对模。对模以后应将校模圈取去，然后进行拉深。也可用定位圈代替校模圈6。工件由刮件环9自凸模上卸下后，由下而出件。

8 拉深力和拉深功的计算

8.1 拉深力的计算

在确定拉深件所需的压力机吨位时，必须先求得拉深力。如果给定了毛坯的材质、毛坯直径 D、板料厚度 t、拉深模的直径 d 以及凹模的圆角半径 r_d 等，则在拉深圆筒形件时，其最大拉深力可以按式（3.4-81）计算：

$$F_{max} = 3\ (\sigma_b + \sigma_s)\ (D - d - r_d)\ t \quad (3.4\text{-}81)$$

式中，F_{max} 为拉深力，N；σ_b 为材料的抗拉强度，MPa；σ_s 为材料的屈服极限，MPa；d 为拉深凹模直径，mm。

对于矩形件，可用经验式（3.4-82）



$$F_{max}=\sigma_b t\ (2\pi r_{底} c_1+Lc_2) \qquad (3.4\text{-}82)$$

式中，F_{max}为拉深力，N；$r_{底}$ 为工件底部圆角半径，mm；L 为直边部分全长，mm；$c_1=0.5$ 用于拉深很浅的工件；$c_1=2.5$ 用于拉深深度为 $5\sim6r_{底}$ 的工件；$c_2=0.2$ 用于间隙较大，且无压边圈时；$c_2=0.3$ 用于压边力为 $1/3\times F_{max}$ 时；$c_2=1.0$ 用于拉深很困难时。

为了更简便地计算拉深力，可采用表 3.4-47 所推荐的实用公式。

表 3.4-47　计算拉深力的实用公式

拉深件型式	拉深工序	公式	查系数 k 的表格编号
无凸缘的筒形零件	第 1 次 第 2 次及以后各次	$F=\pi d_1 t\sigma_b k_1$ $F=\pi d_2 t\sigma_b k_2$	表 3.4-48 表 3.4-49
宽凸缘的筒形零件	第 1 次	$F=\pi d_1 t\sigma_b k_3$	表 3.4-50
带凸缘的锥形及球形件	第 1 次	$F=\pi d_k t\sigma_b k_3$	表 3.4-50
椭圆形盒形件	第 1 次 第 2 次及以后各次	$F=\pi d_{cp1} t\sigma_b k_1$ $F=\pi d_{cp2} t\sigma_b k_2$	表 3.4-48 表 3.4-49
低的矩形盒 （一次工序拉深）	—	$F=(2A+2B-1.72r)\ t\sigma_b k_4$	表 3.4-51
高的方形盒 （多工序拉深）	第 1 次及 2 次以后各次	与筒形件同 $F=(4B-1.72r)\ t\sigma_b k_5$	表 3.4-48、表 3.4-49 表 3.4-52
高的矩形盒 （多工序拉深）	第 1 次及 2 次以后各次	与椭圆盒形件同 $F=(2A_1+2B-1.72r)\ t\sigma_b k_5$	表 3.4-48、表 3.4-49 表 3.4-52
任意形状的拉深件	—	$F=Lt\sigma_b k_6$	表 3.4-53
变薄拉深（圆筒形零件）	—	$F=\pi d_n\ (t_{n-1}-t_n)\ \sigma_b k_7$	—

注：F 为拉深力，N；d_1、d_2 为筒形件的第一次及第二次工序直径，mm，根据料厚中线计算；t 为材料厚度，mm；d_k 为锥形件的小直径，半球形件的直径之半，mm；d_{cp1}、d_{cp2}为椭圆形零件的第一次及第二次工序后的平均直径，mm；d_n 为 n 次工序后的零件外径，mm；A、B 为盒形件的长与宽，mm；r 为盒形件的角部圆角半径，mm；t_{n-1}、t_n 为 $(n-1)$ 次及 n 次拉深工序后的壁厚，mm；σ_b 为材料抗拉强度，MPa；L 为凸模周边长度，mm；k_1、k_2、k_3、k_4、k_5、k_6 为系数，分别由表 3.4-48～表 3.4-53 查得；k_7 为系数，黄铜为 1.6～1.8，钢为 1.8～2.25。

表 3.4-48　筒形件第一次拉深时的系数 k_1 值（材料：08～15）

相对厚度 $t/D\times100$	第一次拉深系数 m_1									
	0.45	0.48	0.50	0.52	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
5.0	0.95	0.85	0.75	0.65	0.60	0.50	0.43	0.35	0.28	0.20
2.0	1.10	1.00	0.90	0.80	0.75	0.60	0.50	0.42	0.35	0.25
1.2		1.10	1.00	0.90	0.80	0.68	0.56	0.47	0.37	0.30
0.8			1.10	1.00	0.90	0.75	0.60	0.50	0.40	0.33
0.5				1.10	1.00	0.82	0.67	0.55	0.45	0.36
0.2					1.10	0.90	0.75	0.60	0.50	0.40
0.1						1.10	0.90	0.75	0.60	0.50

注：1. 当凸模圆角半径 $r_p=(4\sim6)\ t$ 时，系数 k_1 应按表中数值增加 5%。
2. 对于其他材料，根据材料塑性的变化，对查得值作修正（随塑性减低而增大）。

表 3.4-49　筒形件第二次拉深时的系数 k_2 值（材料：08～15）

相对厚度 $t/D\times100$	第二次拉深系数 m_2									
	0.7	0.72	0.75	0.78	0.80	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92
5.0	0.85	0.70	0.60	0.50	0.42	0.32	0.28	0.20	0.15	0.12
2.0	1.10	0.90	0.75	0.60	0.52	0.42	0.32	0.25	0.20	0.14
1.2		1.10	0.90	0.75	0.62	0.52	0.42	0.30	0.25	0.16
0.8			1.00	0.82	0.70	0.57	0.46	0.35	0.27	0.18
0.5			1.10	0.90	0.76	0.63	0.50	0.40	0.30	0.20



续表 3.4-49

相对厚度 $t/D\times100$	第二次拉深系数 m_2									
	0.7	0.72	0.75	0.78	0.80	0.82	0.85	0.88	0.90	0.92
0.2				1.00	0.85	0.70	0.56	0.44	0.33	0.23
0.1				1.10	1.00	0.82	0.68	0.55	0.40	0.30

注：1. 当凸模圆角半径 $r_p=(4\sim6)\ t$ 时，表中 k_2 值应加大5%。
2. 对于第3、4、5次拉深的系数 k_2，由同一表格查出其相应的 m_n 及 $t/D\times100$ 的数值，但需根据是否有中间退火工序而取表中较大或较小的数值：无中间退火时 k_2 取较大值（靠近下面的一个数值），有中间退火时 k_2 取较小值（靠近上面的一个数值）。
3. 对于其他材料，根据材料塑性的变化，对查得值作修正（随塑性降低而增大）。

表 3.4-50 宽凸缘筒形件第一次拉深时的系数 k_3 值（材料：08～15）（用于 $t/D\times100=0.6\sim2$）

凸缘相对直径 d_t/d_1	第一次拉深系数 m_1										
	0.35	0.38	0.40	0.42	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
3.0	1.0	0.9	0.83	0.75	0.68	0.56	0.45	0.37	0.30	0.23	0.18
2.8	1.1	1.0	0.9	0.83	0.75	0.62	0.50	0.42	0.34	0.26	0.20
2.5		1.1	1.0	0.9	0.82	0.70	0.56	0.46	0.37	0.30	0.22
2.2			1.1	1.0	0.90	0.77	0.64	0.52	0.42	0.33	0.25
2.0				1.1	1.0	0.85	0.70	0.58	0.47	0.37	0.28
1.8					1.1	0.95	0.80	0.65	0.53	0.43	0.33
1.5						1.10	0.90	0.75	0.62	0.50	0.40
1.3							1.0	0.85	0.70	0.56	0.45

注：1. 这些系数也可用于带凸缘的锥形及半球形零件在无拉深筋模具上的拉深。当采用拉深筋时，k_3 应增大10%～20%；
2. 对于其他材料，根据材料塑性的变化，对查得值作修正（随塑性减低而增大）。

表 3.4-51 由一次拉深成低矩形件的系数 k_4 值（材料：08～15）

毛坯相对厚度 $t/D\times100$				角部相对圆角半径 r/B				
2～1.5	1.5～1.0	1.0～0.6	0.6～0.3	0.3	0.2	0.15	0.10	0.05
盒形件相对高度 h/B				系数 k_4 值				
1.0	0.95	0.9	0.85	0.7	—	—	—	—
0.90	0.85	0.76	0.70	0.6	0.7	—	—	—
0.75	0.70	0.65	0.60	0.5	0.6	0.7	—	—
0.60	0.55	0.50	0.45	0.4	0.5	0.6	0.7	—
0.40	0.35	0.30	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7

注：对于其他材料，根据材料塑性的变化，对查得值作修正（随塑性减低而增大）。

表 3.4-52 由空心的筒形或椭圆形毛坯拉深高盒形件最后工序的系数 k_5 值（材料：08～15）

毛坯相对厚度/%			角部相对圆角半径 r/B				
t/D	t/d_1	t/d_2	0.3	0.2	0.15	0.1	0.05
			系数 k_5 值				
2.0	4.0	5.5	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
1.2	2.5	3.0	0.50	0.60	0.75	0.80	1.0
0.8	1.5	2.0	0.55	0.65	0.80	0.90	1.1
0.5	0.9	1.1	0.60	0.75	0.90	1.0	—

注：1. 对于矩形盒，d_1、d_2 为第1及第2道工序椭圆形毛坯的小直径。对于方盒形件，d_1、d_2 为第1及第2道工序圆筒毛坯直径。
2. 对于其他材料，视材料塑性好或差（与08、15钢相比），查得的 k_5 值再作或小或大的修正。

表 3.4-53 系数 k_6

制件复杂程度	难加工件	普通加工件	易加工件
k_6	0.9	0.8	0.7

8.2 压床吨位的选择

对于单动压床： $F>F_{拉}+F_{压}$ (3.4-83)

对于双动压床： $F_1>F_{拉}\quad F_2>F_{压}$ (3.4-84)

式中，F 为压床的公称压力；F_1 为内滑块公称压力；F_2 为外滑块公称压力；$F_{拉}$ 为拉深力；$F_{压}$ 为压边力。

8.3 拉深功的计算

拉深力并不是常数，而是随凸模的工作行程改变的（图 3.4-90）。为了计算实际的拉深力（即曲线下的面积），不能用最大拉深力 F_{max}，而应该用其平均值 $F_{平均}$。

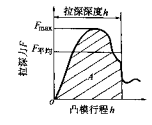


图 3.4-90 拉深力—行程图

1）不变薄拉深

$$A = F_{平均} h \times 10^{-3} = cF_{max} h \times 10^{-3} \qquad (3.4\text{-}85)$$

式中，A 为拉深功，J；F_{max} 为最大拉深力，N；h 为拉深深度，mm；c 为系数，查表 3.4-54。

表 3.4-54 系数 c 与拉深系数的关系

拉深系数 m	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
系数 c	0.8	0.77	0.74	0.70	0.67	0.64

2）变薄拉深

$$A = Fh \times 1.2 \times 10^{-3} \qquad (3.4\text{-}86)$$

式中，F 为变薄拉深力，N；h 为拉深深度，mm；1.2 为安全系数，考虑由于变薄拉深过程中摩擦所增加的能量消耗。

压力机的电动机功率按式（3.4-87）计算：

$$N = \frac{KAn}{60 \times 750 \times \eta_1 \times \eta_2 \times 1.36} \qquad (3.4\text{-}87)$$

式中，N 为压力机电动机功率，kW；K 为不平衡系数，K = 1.2～1.4；A 为拉深功，J；η_1 为压力机效率，取 0.6～0.8；η_2 为电动机效率，取 0.9～0.95；n 为压力机每分钟的行程次数；1.36 为由马力转换成千瓦的转换系数。

9 拉深模工作部分尺寸的确定

9.1 拉深凸凹模间隙确定

1）拉深模的单边间隙

$$c = \frac{d_{凹} - d_{凸}}{2} \qquad (3.4\text{-}88)$$

2）间隙值应合理选取，否则，c 过小会增加摩擦力，使拉深件容易破裂，且易擦伤表面，并降低模具使用寿命，c 过大，又易使拉深件起皱，且影响工件精度。

3）在确定间隙时，应该考虑到毛坯在拉深中外缘的变厚现象，材料厚度偏差及拉深件的精度要求。

4）不用压边圈拉深时

$$c = (1 \sim 1.1)\, t_{max} \text{（末次拉深用小值，中间拉深用大值）} \qquad (3.4\text{-}89)$$

式中，t_{max} 为材料厚度的最大极限尺寸，mm。

5）用压边圈拉深时

$$c = t_{max} + Kt \qquad (3.4\text{-}90)$$

式中，t_{max} 为板料厚度的最大极限尺寸，mm；t 为板料厚度的基本尺寸，mm；k 为系数，见表 3.4-55。

表 3.4-55 间隙系数 K

拉深工序数		材料厚度 t/mm		
		0.5～2	2～4	4～6
1	第一次	0.2 (0)	0.1 (0)	0.1 (0)
2	第一次 第二次	0.3 0.1 (0)	0.25 0.1 (0)	0.2 0.1 (0)
3	第一次 第二次 第三次	0.5 0.3 0.1 (0)	0.4 0.25 0.1 (0)	0.35 0.2 0.1 (0)
4	第一、二次 第三次 第四次	0.5 0.3 0.1 (0)	0.4 0.25 0.1 (0)	0.35 0.2 0.1 (0)
5	第一、二、三次 第四次 第五次	0.5 0.3 0.1 (0)	0.4 0.25 0.1 (0)	0.35 0.2 0.1 (0)

注：1. 表中数值适用于一般精度（未注公差尺寸的极限偏差）工件的拉深工作。
2. 末道工序括弧内的数字，适用于较精密拉深件（IT11～IT13 级）。

材料厚度公差小或工件精度要求较高的，应取较小的间隙，按表 3.4-56 选取。

表 3.4-56 有压边圈拉深时单边间隙值

总拉深次数	拉深工序	单边间隙 c
1	一次拉深	(1～1.1) t
2	第一次拉深 第二次拉深	$1.1t$ (1～1.05) t
3	第一次拉深 第二次拉深 第三次拉深	$1.2t$ $1.1t$ (1～1.05) t
4	第一、二次拉深 第三次拉深 第四次拉深	$1.2t$ $1.1t$ (1～1.05) t
5	第一、二、三次拉深 第四次拉深 第五次拉深	$1.2t$ $1.1t$ (1～1.05) t

注：1. t 为材料厚度，取材料允许偏差的中间值。
2. 当拉深精密工件时，最末一次拉深间隙取 $c = t$。

6）对于拉深件精度要求达到 IT11～IT13 级者，其最后一次拉深工序的间隙值取为：c = (1～0.95) t（黑色金属取 1，有色金属取 0.95）。t 为板料厚度的基本尺寸，mm。

7）拉深盒形件时凸模与凹模之间的间隙，在直边部分可参考 U 形工件的弯曲模的间隙来确定，在圆角部分由于材料变厚，故其间隙应比直边部分间隙大 $0.1t$。

8）在多次拉深工序中，除最后一次拉深外，间隙的取向是没有规定的。



对于最后一次拉深工序：

① 尺寸标注在外形的拉深件，以凹模为基准，间隙取在凸模上，即减小凸模尺寸得到间隙。

② 尺寸标注在内形的拉深件，以凸模为基准，间隙取在凹模上，即增加凹模尺寸得到间隙。

9.2 拉深凸凹模圆角半径

1）拉深凹模的圆角半径可按经验公式（3.4-91）确定：

$$r_d = 0.8\sqrt{(D-d)\ t} \qquad (3.4\text{-}91)$$

式中，r_d 为凹模圆角半径，mm；D 为毛坯直径，mm；d 为凹模内径，mm；t 为材料厚度，mm。

表3.4-57所列拉深凹模的圆角半径 r_d 的数值就是按上述公式的参数关系制定的。

当工件直径 $d>200$ mm 时，拉深凹模圆角半径应按式（3.4-92）确定：

$$r_{d\min} = 0.039d + 2 \qquad (3.4\text{-}92)$$

2）拉深凹模圆角半径也可以根据工件材料的种类与厚度来确定（表3.4-58）。

一般对于钢的拉深件，$r_d=10t$，对于有色金属（铝、黄铜、紫铜）的拉深件，$r_d=5t$。

3）以后各次拉深时，r_d 值应逐渐减小，其关系为：

$$r_{dn} = (0.6 \sim 0.9)\ r_{d(n-1)} \qquad (3.4\text{-}93)$$

4）拉深凸模的圆角半径根据下述规定来选取。

① 除最末一次拉深工序外，其他所有各次拉深工序中，凸模圆角半径 r_p 可取与凹模圆角半径相等或略小的数值：

$$r_p = (0.6 \sim 1)\ r_d \qquad (3.4\text{-}94)$$

② 在最后一次拉深工序中，凸模圆角半径应与工件的圆角半径相等。但对于厚度 <6 mm 的材料，其数值不得小于（2~3）t。对于厚度 >6 mm 的材料，其值不得小于（1.5~2）t。

③ 如果工件要求的圆角半径很小，则在最后一次拉深工序以后，须进行整形。

5）有压边圈的拉深模，相邻两次拉深工序的凸模和凹模圆角半径的相互关系见图3.4-91。

带斜角的凸模及凹模（图3.4-91a），一般用来拉深中型及大型尺寸的筒形件。对于非圆形工件，$n-1$ 次底部做成斜角，将有利于成形。对于带斜角的凸模，其圆角半径应增大到 $r_p=(1.5\sim2)\ r_d$。

表3.4-57 拉深凹模圆角半径 r_d 的数值 mm

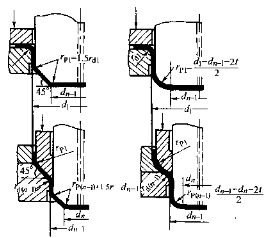
$D-d$ \ 材料厚度 t	~1	>1~1.5	>1.5~2	>2~3	>3~4	>4~5
~10	2.5	3.5	4.0	4.5	5.5	6.5
>10~20	4.0	4.5	5.5	6.5	7.5	9.0
>20~30	4.5	5.5	6.5	8.0	9.0	11.0
>30~40	5.5	6.5	7.5	9.0	10.5	12.0
>40~50	6.0	7.0	8.0	10.0	11.5	14.0
>50~60	6.5	8.0	9.0	11.0	12.5	15.5
>60~70	7.0	8.5	10.0	12.0	13.5	16.5
>70~80	7.5	9.0	10.5	12.5	14.5	18.0
>80~90	8.0	9.5	11.0	13.5	15.5	19.0
>90~100	8.0	10.0	11.5	14.0	16.0	20.0
>100~110	8.5	10.5	12.0	14.5	17.0	20.5
>110~120	9.0	11.0	12.5	15.5	18.0	21.5
>120~130	9.5	11.5	13.0	16.0	18.5	22.5
>130~140	9.5	11.5	13.5	16.5	19.0	23.5
>140~150	10.0	12.0	14.0	17.0	20.0	24.0
>150~160	10.0	12.5	14.5	17.5	20.5	25.0

注：D 为第一次拉深时的毛坯直径，或第 $n-1$ 次拉深后的工件直径，mm；
d 为第一次拉深后的工件直径，或第 n 次拉深后的工件直径，mm。

表3.4-58 拉深凹模的圆角半径 r_d 的数值 mm

材料	厚度 t	凹模圆角半径 r_d	材料	厚度 t	凹模圆角半径 r_d
钢	<3	（10~6）t	铝 黄铜、紫铜	<3	（8~5）t
	>3~6	（6~4）t		3~6	（5~3）t
	>6	（4~2）t		>6	（3~1.5）t

注：1. 对于第一次拉深和较薄的材料，应取表中的最大极限值。
2. 对于以后各次拉深和较厚的材料，应取表中的最小极限值。



(a) 带斜角的凸模及凹模　(b) 带圆角的凸模及凹模

图 3.4-91　凸模与凹模圆角半径的相互关系

带圆角的凸模及凹模（图 3.4-91b），则用于拉深比较小（$d\leqslant100$ mm）的零件及带宽凸缘与形状复杂的零件。

9.3 拉深凸凹模工作部分结构形状及尺寸

1）确定凸模和凹模工作部分尺寸时，应考虑模具的磨损和拉深件的弹复，其尺寸公差只在最后一道工序考虑。

2）最后一道工序凸、凹模工作部分尺寸，应按拉深件尺寸标注方式的不同，由表 3.4-59 所列公式进行计算。

3）凸、凹模的制造公差

① 圆形凸、凹模的制造公差，根据工件的材料厚度与工件直径来选定，其数值列于表 3.4-60。

② 非圆形凸、凹模的制造公差可根据工件公差来选定。若拉深件的公差为 IT12、13 级以上者，凸、凹模制造公差采用 IT8、9 级精度；若拉深件的公差为 IT14 级以下者，则凸、凹模制造公差采用 IT10 级精度。但若采用配作时，只在凸模或凹模上标注公差，另一方则按间隙配作。如拉深件是标注外形尺寸时，则在凹模上标注公差；反之，标注内形尺寸时，则在凸模上标注公差。

4）拉深凸模的出气孔尺寸如图 3.4-92 所示，可查表 3.4-61。

表 3.4-59　拉深模工作部分尺寸计算公式

尺寸标注方式	凹模尺寸 D_d	凸模尺寸 d_p
$D_{-\Delta}^{0}$　c　d_p　D_d 标注外形尺寸	$D_d=(D-0.75\Delta)^{+\delta_d}_{0}$	$d_p=(D-0.75\Delta-2c)^{0}_{-\delta_p}$
$d^{+\Delta}_{0}$　c　d_p　D_d 标注内形尺寸	$D_d=(d+0.4\Delta+2c)^{+\delta_d}_{0}$	$d_p=(d+0.4\Delta)^{0}_{-\delta_p}$

注：D_d 为凹模尺寸；d_p 为凸模尺寸；D 为拉深件外形的基本尺寸；d 为拉深件内形的基本尺寸；c 为凸、凹模的单边间隙；δ_d 为凹模的制造公差；δ_p 为凸模的制造公差。

表 3.4-60　圆形拉深模凸、凹模的制造公差　mm

材料厚度	工件直径的基本尺寸							
	~10		>10~50		>50~200		>200~500	
	δ_d	δ_p	δ_d	δ_p	δ_d	δ_p	δ_d	δ_p
0.25	0.015	0.010	0.02	0.010	0.03	0.015	0.03	0.015
0.35	0.020	0.010	0.03	0.020	0.04	0.020	0.04	0.025
0.50	0.030	0.015	0.04	0.030	0.05	0.030	0.05	0.035
0.80	0.040	0.025	0.06	0.035	0.06	0.040	0.06	0.040
1.00	0.045	0.030	0.07	0.040	0.08	0.030	0.08	0.060
1.20	0.055	0.040	0.08	0.050	0.09	0.060	0.10	0.070
1.50	0.065	0.050	0.09	0.060	0.10	0.070	0.12	0.080
2.00	0.080	0.055	0.11	0.070	0.12	0.080	0.14	0.090
2.50	0.095	0.060	0.13	0.085	0.15	0.100	0.17	0.120
3.50	—	—	0.15	0.100	0.18	0.120	0.20	0.140

注：1. 表列数值用于未精压的薄钢板。
2. 如用精压钢板，则凸模及凹模的制造公差，等于表列数值的 20%～25%。
3. 如用有色金属，则凸模及凹模的制造公差，等于表列数值的 50%。

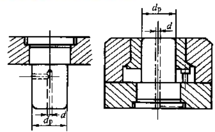


图 3.4-92　拉深凸模出气孔

表 3.4-61　拉深凸模出气孔尺寸　　mm

凸模直径 d_p	~50	>50~100	>100~200	>200
出气孔直径 d	5	6.5	8	9.5

10　拉深过程中的辅助工序

拉深中的辅助工序很多，大致可以分为：拉深工序前的辅助工序，如材料的软化热处理、清洗、润滑等；拉深工序间的辅助工序，如软化热处理、涂漆、润滑等；拉深后的辅助工序、如消除应力退火、清洗、打毛刺、表面处理、检验等。

10.1　润滑

在拉深过程中凡是与毛坯接触的模具表面上均有摩擦存在。

在凸缘部分和凹模入口处的有害摩擦不仅降低了拉深变形程度（增加了拉深件在危险断面处的载荷），而且会导致零件表面的严重擦伤，降低模具的寿命，这在拉深不锈钢、高温合金等黏性大的材料更是如此。

因此，采用润滑剂的目的是：

1）减少模具和拉深件之间的有害摩擦，提高拉深变形程度和减少拉深次数。

2）提高凸模、凹模的使用寿命。

3）减小在危险断面处的变薄。

4）提高冲压零件的表面质量。

在拉深中使用润滑剂的原则是：

1）当拉深材料中的应力接近于强度极限时，必须采用含有大量粉状填料（如白垩、石墨、滑石等，质量分数不小于 20%）的润滑剂。

2）当拉深材料中的应力不大时，允许采用不带填料的油剂润滑剂。

3）当拉深圆锥形类零件时，为了有意增加摩擦抗力以减少毛坯起皱，同时又要求不断通入润滑液进行冷却时，则一般采用乳化液。

4）在变薄拉深时，润滑剂不仅是为了减少摩擦，同时又起冷却模具的作用，因此不可能采用干摩擦。在拉深钢质零件时，往往在毛坯表面进行镀铜或磷化处理，使毛坯表面形成一层与模具的隔离层，它能贮存流体润滑剂和在拉深过程中具有“自润”性能。

5）拉深不锈钢、高温合金等粘模严重、强化剧烈的材料，一般也需要对毛坯表面进行“隔离层”处理，目前常用的方法是在金属表面喷涂氯化乙烯漆（G01-4），而在拉深时再另涂机油。

常用润滑剂见表 3.4-62 和表 3.4-63。

表 3.4-62　拉深低碳钢用润滑剂

简称号	润滑剂成分	质量分数/%	附注
5 号	锭子油 鱼肝油 石墨 油酸 硫磺 钾肥皂 水	43 8 15 8 5 6 15	用这种润滑剂可收到最好的效果，硫磺应以粉末状加入
6 号	锭子油 黄油 滑石粉 硫磺 酒精	40 40 11 8 1	硫磺应以粉末加入
10 号	锭子油 硫化蓖麻油 鱼肝油 白垩粉 油酸 苛性钠 水	33 1.6 1.2 45 5.5 0.7 13	润滑剂很容易去掉，用于单位压力大的拉深
2 号	锭子油 黄油 鱼肝油 白垩粉 油酸 水	12 25 12 20.5 5.5 25	这种润滑剂比以上几种略差
9 号	锭子油 黄油 石墨 硫磺 酒精 水	20 40 20 7 1 12	将硫磺溶于温度约 160℃ 的锭子油内，其缺点是保存时间太久会分层
8 号	钾肥皂 水	20 80	将肥皂溶在温度为 60~70℃ 水里，用于球形及抛物线形工件的拉深
	乳化液 白垩粉 焙烧苏打 水	37 45 1.3 16.7	可溶解的润滑剂，加 3% 的硫化蓖麻油后，可改善其效用

表 3.4-63　拉深有色金属、不锈钢及高温合金时用的润滑剂

金属材料	润滑方式
硬铝	植物油乳化液
铝	植物（豆）油，工业凡士林
黄铜、紫铜、青铜	菜油或肥皂与油的乳化液（将油与浓肥皂液混合）
铁素体型不锈钢、奥氏体型不锈钢及高温合金	用氯化乙烯漆（G01-4）喷涂板料表面，拉深时再另涂机油
镍及其合金	肥皂与油的乳化液



10.2 热处理

用于拉深的材料，为了提高拉深变形程度，一般均应是软化状态。

在拉深过程中，材料一般都产生冷作硬化。

冲压所用的金属按硬化率可分为两类：

1）普通硬化金属 出现缩颈时的断面收缩率 $\psi_b = 0.2 \sim 0.25$（如08，10，15号钢，黄铜和经过退火的铝）。

2）高度硬化金属 $\psi_b = 0.25 \sim 0.30$（如不锈钢、高温合金、退火紫铜等）。

硬化能力较弱的金属不能用于拉深。

对于普通硬化的金属，若工艺过程制订的正确，模具设计合理，一般可不需要进行中间退火，而对于高度硬化的金属，一般在一、二次拉深工序之后即需进行中间热处理。

不需要中间热处理而能完成的拉深次数见表3.4-64。

表3.4-64 不需要热处规能连续拉深的次数

材 料	次 数
08，10，15号钢	3～4
铝	4～5
H62，H68黄铜	2～4
不锈钢及高温合金	1～2
镁合金	1
钛合金	1

如果降低每次拉深时的变形程度（即增加拉深系数）增加拉深次数，则由于每次拉深后的危险断面不断往上移动，拉裂的矛盾得以缓和，于是可以增加总的变形程度而不需要或可减少中间热处理工序。

中间工序的热处理主要有两种。

1）低温退火。这种热处理方式主要用于消除硬化和恢复塑性。其退火规范是：加热至略低于 Ac_1，然后在空气中冷却。低温退火的目的是使材料发生再结晶，材料的硬化消除，塑性得到恢复，从而能够继续进行拉深。

低温（再结晶）退火的温度见表3.4-65。

表3.4-65 低温（再结晶）退火温度

材料	加热温度/℃	附注
08，10，15，20号钢	600～650	空气中冷却
紫铜T1，T2	400～450	空气中冷却
黄铜H62，H68	500～540	空气中冷却
铝，铝合金LF2，LF21	220～250	保温40～45 min
镁合金MB1，MB8	260～350	保温60 min
工业纯钛	650～700	空气中冷却
钛合金TA5	550～600	空气中冷却

低温退火的结果会使临界变形（如碳钢变形为5%～10%、不锈钢及高温合金为8%～14%）之后的材料晶粒剧烈长大，应予以注意。另外，由于低温退火时保温时间较长（有时以小时计算），对低碳钢、特别是含碳质量分数在0.2%以下的低碳钢，要考虑如何防锈的问题。低温退火的结果使残余应力得以全部消除。

2）高温退火。对某些材料或零件，倘若低温退火的结果还不够满意，可以采用高温退火。其规范是：把材料加热至 Ac_3 以上30～40℃，保温后，按所给速度予以冷却。高温退火温度见表3.4-66。

表3.4-66 不同材料的高温退火规范

材料	加热温度/℃	保温时间/min	冷却
08，10，15号钢	700～800	20～40	在空盒中冷却
A1，A2	900～920	20～40	在空盒中冷却
20，25，30，A3，A4	700～720	60	炉内冷却
25CrMnSiA，30CrMnSiA	650～700	12～18	空气中冷却
1Cr18Ni9Ti	1 050～1 100	5～15	空气或水冷
Cr20Ni80Ti（GH4030）	1 020～1 050	10～15	空气中冷却
紫铜T1，T2	600～650	30	空气中冷却
黄铜H62，H68	650～700	15～30	空气中冷却
镍	750～850	20	空气中冷却
铝，防锈铝LF21，LF2	300～350	30	250℃以后空冷
硬铝LY12	350～400	30	250℃以后空冷

奥氏体不锈钢及高温合金材料的软化是将这类材料加热至1 000℃以上，然后在空气中冷却，形成单相组织，从而使塑性得到恢复，这种热处理叫淬火。

拉深后的工件常常需要进行消除残余应力的低温退火。一般碳钢及合金钢的退火温度为500～650℃，奥氏体型不锈钢及高温合金仍然采用淬火处理。不论是工序间热处理还是最后消除应力的热处理，应尽可能立即进行，以免由于长期存放，工件在内应力的作用下产生变形或龟裂。特别对不锈钢、高温合金及黄铜等硬化严重的材料所制成的零件更是如此，这些零件拉深后不经热处理是不得存放的。

10.3 酸洗

工件经热处理之后，表面的氧化皮及其他污物，必须进行酸洗清理。酸洗槽中溶液成分如表3.4-67所示。

表3.4-67 酸洗溶液成分

工件材料	化学成分	份量	说明
低碳钢	硫酸或盐酸	15%～20%	
	水	其余	
高碳钢	硫酸	10%～15%	预浸
	水	其余	
高碳钢	苛性钠或苛性钾	50～100 g/L	最后酸洗
不锈钢	硝酸	10%	得到光亮的表面
	盐酸	1%～2%	
	硫化胶	0.1%	
	水	其余	
铝及其合金	硝酸	200份（质量）	预浸
	盐酸	1～2份（质量）	
	碳黑	1～2份（质量）	
铜及其合金	硝酸	75份（质量）	光亮酸洗
	硫酸	100份（质量）	
	盐酸	1份（质量）	
铝及锌	苛性钠或苛性钾	100～200 g/L	闪光酸洗
	食盐	13 g/L	
	盐酸	50～100 g/L	



酸洗有时也用在拉深前的毛坯准备工作中。

不锈钢酸洗近年来采用酸-碱合用的办法，即预先在沸腾的碱液（苛性钠80%、硝酸钾20%，质量分数，后同）中浸10~30 min，然后在18%的硫酸或盐酸中浸5~20 min。这种方法既大大减少金属和酸液的消耗，又提高了生产率。

酸洗后需要进行仔细的表面洗涤，以便将残留在工件表面上的酸液洗掉。其办法是：先在流动的冷水中清洗，然后放在加温至60~80℃的弱碱液中中和，最后用热水洗涤。

11 拉深件废品类型、产生原因及防止措施

综合拉深或形过程分析，并结合生产实践经验可将拉深件质量不合格或产生废品的原因大致归纳为以下几个方面：

1）产品设计不符合拉深工艺要求。
2）零件材料选择不当或质量不好。
3）工序设计不够合理。
4）冲模设计和制造不合工艺要求。
5）生产中模具未调整好或操作疏忽。

兹将几种在生产中经常遇到的拉深件废品的类型、产生的原因及其预防或解决办法列于表3.4-68。

12 拉深零件工序安排实例

拉深件工序安排的一般规则如下。

1）在大批量生产中，在凸、凹模模壁强度允许的条件下，应采用落料、拉深复合工艺。

表3.4-68 拉深件废品类型、产生的原因及其预防或解决办法

废品类型	产生原因	预防或解决办法
拉深件尺寸不符合图纸要求	(1) 拉深件高度不够 1）毛坯尺寸过小 2）凸、凹模间隙过大 3）凸模圆角半径太小	1）放大毛坯尺寸 2）调换凸模或凹模，调整间隙 3）磨大凸模圆角半径
	(2) 拉深件高度过大 1）毛坯尺寸过大 2）凸、凹模间隙太小 3）凸模圆角半径太大	1）减小毛坯尺寸 2）磨削凸模和凹模，调整间隙 3）磨小凸模圆角半径
	(3) 壁厚不匀并与工件底部倾斜 1）凸模与凹模的轴线不同心，造成间隙不均匀 2）凹模与定位零件不同心 3）凸模轴线与凹模顶面不垂直 4）压边力不均匀 5）凹模形状不正确	1）调整凸模或凹模使之同心 2）调整定位零件的位置 3）调整凸模或凹模 4）调整压边装置 5）修磨凹模
起皱现象	1）压边力太小或不匀 2）凸模与凹模的间隙太大 3）材料厚度太小，超过其许可下偏差，或材料塑性低 4）凹模圆角半径太大 5）按计算应使用压边圈而未用	1）调整压边力 2）调整间隙，调换凸模或凹模 3）调换材料 4）修磨凹模或修改压边装置 5）使用压边圈
裂纹或破裂	1）材料质量不好（表面粗糙，金相组织不均匀，表面有划痕、擦伤等缺陷） 2）压边力太大或不均匀（材料有变薄，呈现韧性裂口） 3）凹模圆角不光洁，有磨损或裂纹 4）凹模圆角半径太小（材料严重变薄） 5）凸凹模间隙太小（材料严重变薄） 6）工艺规程（如润滑、退火等）不合理 7）凸模圆角半径太小 8）毛坯边缘不合要求，有较大毛刺 9）毛坯尺寸太大，形状不正确 10）凸、凹模不同心，不平行 11）拉深系数取得太小	1）调换适当材料 2）调整压边力 3）修磨凹模或更换凹模 4）加大凹模圆角半径 5）修磨凸模或凹模，调整间隙 6）修改工艺规程 7）修磨凸模 8）调整落料模，去除毛刺 9）修改毛坯尺寸及形状 10）调整冲模 11）增加工序，调节各工序的变形量
表面质量不好，有拉毛现象	1）间隙过小或不均匀 2）凹模圆角部分粗糙 3）冲模工作面或材料表面不清洁 4）凸、凹模硬度低，有金属粘模 5）润滑不当	1）修磨凸、凹模间隙 2）修磨凹模圆角 3）清洁表面 4）提高凸、凹模硬度或更换凹模 5）采用合理的润滑剂及润滑方法
工件外形不平整	1）凸模上无出气孔 2）材料的回弹作用 3）凸、凹模间隙太大 4）矩形件的末道变形程度取得太大	1）增加出气孔或整形工序 2）增加整形工序 3）调整间隙 4）调整变形程度或增加整形工序

2）除底部孔有可能与落料、拉深复合冲压外，凸缘部分及侧壁部分的孔、槽均需在拉深工序完成后再冲出。

3）当拉深件的尺寸精度要求高或带有小的圆角半径时，需要增加整形工序。

4）修边工序一般安排在整形工序之后。

5）修边冲孔常可复合完成。

6）窄凸缘零件应先拉成圆筒形，然后形成锥形凸缘，最后经校平获得平凸缘。

7）宽凸缘零件应先按零件要求的尺寸拉出凸缘直径，并在以后拉深工序中保持凸缘直径不变。

8）双壁空心零件采用反拉深法能获得良好的效果。

9）阶梯形零件拉深的规则：

① 先拉深内部形状，然后再拉深外部形状。

② 先将零件拉成初步形状，其直的及斜的壁部连以较大的圆角半径。零件的最后形状（角部、凸出部分等），应在最后工序中才压出来。

③ 在每道工序中拉入凹模的材料，应比计算数值多余3%～5%，以满足在下道工序中进一步变形的需要。如果材料不够，会将工件拉裂。

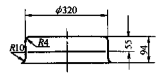
10）锥度和深度大的锥形件，先拉深出大端（口部）直径，然后在以后每次工序中将所有比零件大出的部分拉深成锥形表面。

11）头部带凹形的圆筒形件，当凹部深时，可先拉深出外形，再用宽凸缘成形法成形凹部。

12）复杂形状零件，一般是先拉深内部形状，然后再拉外部形状。

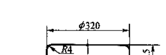
13）多次拉深加工硬化严重的材料时，必须进行中间退火。

图 3.4-93～图 3.4-107 是各种拉深件拉深工序示例。



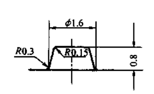
(a) 工序1　拉深，m_1=0.66，凸模圆角半径 r_{p1}=4mm，凹模圆角半径 r_{d1}=10mm

(b) 工序2　切边

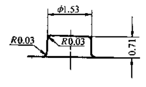


(c) 工序3　拉深，凸模圆角半径 r_{p3}=4mm，凹模圆角半径 r_{d3}=8.5mm

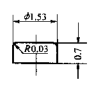
图 3.4-93　拉深件（材料：拉深钢板，厚度 t = 1 mm，坯料直径 485 mm）



(a) 工序1　拉深，m_1=0.53，$Z/2$=1.4t

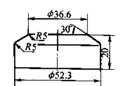


(b) 工序2　整形，$Z/2$=1.0t

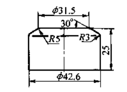


(c) 工序3　切边

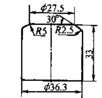
图 3.4-94　极小拉深件（材料：镍板，厚度 t = 0.125 mm，坯料直径 3 mm）



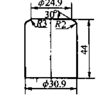
(a) 工序1 落料拉深，m_1=0.75，坯料直径70mm，$Z/2$=1.3t



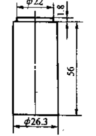
(b) 工序2 再拉深，m_2=0.81，凹模圆角半径r_{d2}=3.0mm，$Z/2$=1.3t



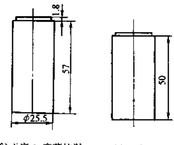
(c) 工序3 再拉深，m_3=0.85，凹模圆角半径r_{d3}=3.0mm，$Z/2$=1.3t



(d) 工序4 再拉深，m_2=0.85，凹模圆角半径r_{d4}=3.0mm，$Z/2$=1.3t

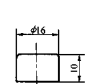


(e) 工序5 再拉深，m_5=0.81mm，凹模圆角半径r_{d5}=2.0mm，$Z/2$=1.3t

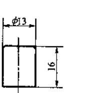


(f) 工序6 变薄拉深，m_6=0.97，凹模圆角半径r_{d6}=2.0mm，$Z/2$=0.8t　(g) 工序7 切边

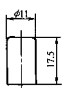
图 3.4-95 深拉深件（材料：拉深钢板，厚度 t = 0.3 mm）



(a) 工序1 落料拉深，m_1=0.53，坯料直径30mm，凸模圆角半径r_{p1}=1.2mm，凹模圆角半径r_{d1}=0.8mm，$Z/2$=1.06t

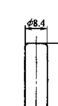


(b) 工序2 再拉深，m_2=0.81，凸模圆角半径r_{p2}=1.0mm，凹模圆角半径r_{d2}=0.7mm，$Z/2$=1.05t



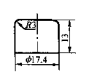
(c) 工序3 再拉深，m_3=0.85，凸模圆角半径r_{p3}=1.0mm，凹模圆角半径r_{d3}=0.7mm，$Z/2$=1.05t

(d) 工序4 再拉深，m_4=0.86，凸模圆角半径r_{p4}=1.0mm，凹模圆角半径r_{d4}=0.7mm，$Z/2$=1.05t

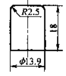


(e) 工序5 再拉深，m_2=0.88，凸模圆角半径r_{p5}=1.0mm，凹模圆角半径r_{d5}=0.7mm，$Z/2$=1.05t

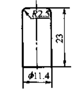
图 3.4-96 深拉深件（材料：镍板，厚度 t = 0.25 mm）



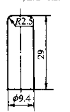
(a) 工序1 落料拉深，m_1=0.5，凹模圆角半径r_{d1}=3.0mm，$Z/2$=1.2t，退火



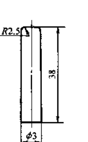
(b) 工序2 再拉深，m_2=0.8，凹模圆角半径r_{d2}=3.0mm，$Z/2$=1.2t



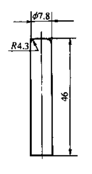
(c) 工序3 再拉深，m_3=0.82，凹模圆角半径r_{d3}=3.0mm，$Z/2$=1.2t



(d) 工序4 变薄拉深，m_4=0.82，凹模圆角半径r_{d4}=5.0mm，$Z/2$=0.92t，退火

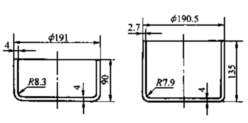


(e) 工序5 变薄拉深，m_5=0.85，凹模圆角半径r_{d5}=5.0mm，$Z/2$=0.84t，退火

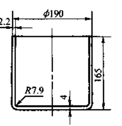


(f) 工序6 变薄拉深，m_6=0.97，凹模圆角半径r_{d6}=5.0mm，$Z/2$=0.8t，退火

图 3.4-97 深拉深件（材料：黄铜板，厚度 t = 0.5 mm，坯料直径 35 mm）

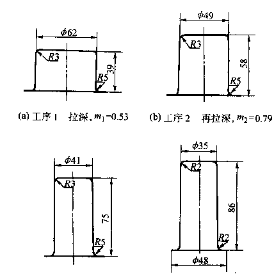


(a) 工序1 拉深，m_1=0.6　(b) 工序2 变薄拉深，$(t-t_1)/t$=(4−2.7)/4=32%



(c) 工序3 变薄拉深，$(t_1-t_2)/t_1$=(2.7−2.2)/2.7=19%

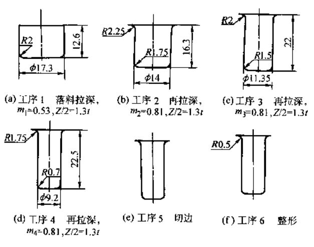
图 3.4-98 变薄拉深件（材料：拉深钢板，厚度 t = 0.5 mm，坯料直径 117 mm）



(a) 工序1　拉深，m_1=0.53　(b) 工序2　再拉深，m_2=0.79

(c) 工序3　再拉深，m_3=0.84　(d) 工序4　再拉深，m_1=0.85

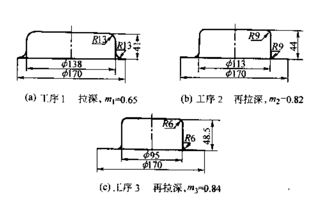
图 3.4-99　小凸缘拉深件（材料：拉深钢板，厚度 t = 0.5 mm，坯料直径 117 mm）



(a) 工序1　落料拉深，m_1=0.53，$Z/2$=1.3t　(b) 工序2　再拉深，m_2=0.81，$Z/2$=1.3t　(c) 工序3　再拉深，m_3=0.81，$Z/2$=1.3t

(d) 工序4　再拉深，m_4=0.81，$Z/2$=1.3t　(e) 工序5　切边　(f) 工序6　整形

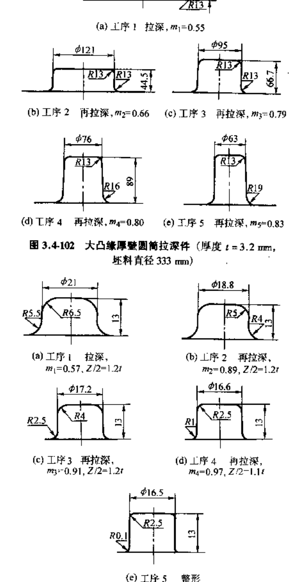
图 3.4-100　小凸缘深拉深件（材料：拉深钢板，厚度 t = 0.3 mm，坯料直径 32.6 mm）



(a) 工序1　拉深，m_1=0.65　(b) 工序2　再拉深，m_2=0.82

(c) 工序3　再拉深，m_3=0.84

图 3.4-101　大凸缘大拉深件（坯料直径 213 mm）



(a) 工序1　拉深，m_1=0.55

(b) 工序2　再拉深，m_2=0.66　(c) 工序3　再拉深，m_3=0.79

(d) 工序4　再拉深，m_4=0.80　(e) 工序5　再拉深，m_5=0.83

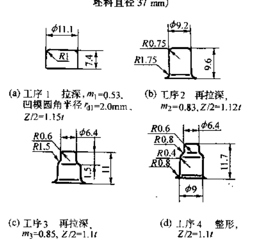
图 3.4-102　大凸缘厚壁圆筒拉深件（厚度 t = 3.2 mm，坯料直径 333 mm）

(a) 工序1　拉深，m_1=0.57、$Z/2$=1.2t　(b) 工序2　再拉深，m_2=0.89，$Z/2$=1.2t

(c) 工序3　再拉深，m_3=0.91，$Z/2$=1.2t　(d) 工序4　再拉深，m_4=0.97，$Z/2$=1.1t

(e) 工序5　整形

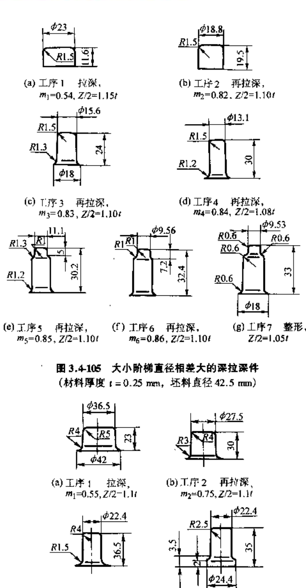
图 3.4-103　大凸缘小圆角半径拉深件（材料厚度 t = 1.8 mm，坯料直径 37 mm）



(a) 工序1　拉深，m_1=0.53，凹模圆角半径 r_{d1}=2.0mm，$Z/2$=1.15t　(b) 工序2　再拉深，m_2=0.83，$Z/2$=1.12t

(c) 工序3　再拉深，m_3=0.85，$Z/2$=1.1t　(d) 工序4　整形，$Z/2$=1.1t

图 3.4-104　小阶梯形拉深件（材料：黄铜板，厚度 t = 0.4 mm，坯料直径 21 mm）



(a) 工序 1　拉深，$m_1=0.54$，$Z/2=1.15t$　(b) 工序 2　再拉深，$m_2=0.82$，$Z/2=1.10t$

(c) 工序 3　再拉深，$m_3=0.83$，$Z/2=1.10t$　(d) 工序 4　再拉深，$m_4=0.84$，$Z/2=1.08t$

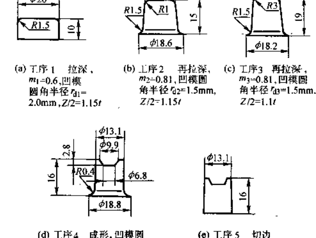
(e) 工序 5　再拉深，$m_5=0.85$，$Z/2=1.10t$　(f) 工序 6　再拉深，$m_6=0.86$，$Z/2=1.10t$　(g) 工序 7　整形，$Z/2=1.05t$

图 3.4-105　大小阶梯直径相差大的深拉深件（材料厚度 $t=0.25$ mm，坯料直径 42.5 mm）

(a) 工序 1　拉深，$m_1=0.55$，$Z/2=1.1t$　(b) 工序 2　再拉深，$m_2=0.75$，$Z/2=1.1t$

(c) 工序 3　再拉深，$m_3=0.81$，$Z/2=1.1t$　(d) 工序 4　再拉深，$m_4=0.81$，$Z/2=1.05t$

图 3.4-106　大小阶梯直径相差小的深拉深件（材料：拉深钢板，厚度 $t=0.5$ mm，坯料直径 66 mm）



(a) 工序 1　拉深，$m_1=0.6$，凹模圆角半径 $r_{d1}=2.0$mm，$Z/2=1.15t$　(b) 工序 2　再拉深，$m_2=0.81$，凹模圆角半径 $r_{d2}=1.5$mm，$Z/2=1.15t$　(c) 工序 3　再拉深，$m_3=0.81$，凹模圆角半径 $r_{d3}=1.5$mm，$Z/2=1.1t$

(d) 工序 4　成形，凹模圆角半径 $r_{d4}=0.4$mm，$Z/2=1.05t$　(e) 工序 5　切边

图 3.4-107　浅内凹拉深件（材料：不锈钢，厚度 $t=0.25$ mm，坯料直径 33 mm）

编写：刘郁丽（西北工业大学）
杨　合（西北工业大学）

第 5 章　成　　形

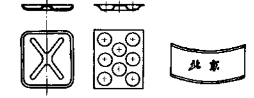
1　胀形与翻边

1.1　胀形

胀形是利用模具使板料或管状毛坯在双向拉应力的作用下，厚度变薄而表面积增大，以获得所需零件的加工方法。胀形可分为平板毛坯胀形和管状毛坯胀形两种情况。可采用不同的方法来实现，如：刚模胀形、橡皮胀形和液压胀形等。

（1）平板毛坯胀形

平板毛坯胀形，俗称起伏成形或局部成形。是一种使材料在双向拉应力的作用下，形成局部的凹进或凸起，借以改变毛坯形状的方法。根据工件的要求，可以在平板上压出各种形状，如：加强筋和凸形压制（图 3.5-1a），零件及艺术装饰品的浮雕形压制（凸凹形，图 3.5-1b）等，在生产中应用较为广泛。



(a) 加强肋和凸形压制　　(b) 汽车前围压字

图 3.5-1　平板毛坯胀形例子

在宽凸缘拉深中，当零件的凸缘宽度大于某一数值后，凸缘部分不再产生明显的塑性流动，毛坯的外缘尺寸在成形前后保持不变。零件的成形将主要靠凸模下方及附近材料的拉薄，板限成形高度与毛坯直径不再有关，这一阶段就是起伏成形阶段。它与宽凸缘拉深的分界点取决于材料的应变强化率，模具几何参数和压边力的大小，其 d/D_0 约在 0.38～0.35 之间，如图 3.5-2 所示。图中，曲线以上为破裂区，以下为安全区，线上为临界状态。

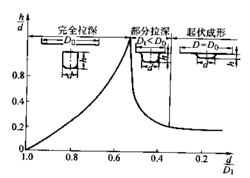


图 3.5-2　拉深与胀形的分界

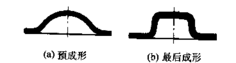
加强肋的压制，广泛地应用于汽车、飞机、车辆、仪表和无线电等工业中。压制多用金属模，也可以在液压机上用橡胶或液压成形。

根据零件形状的复杂程度和材料性质，平板毛坯胀形可以由一道或几道工序完成。材料在一次成形工序中的极限伸长率，可以概略地根据变形材料的延伸率来检验，即：

$$\frac{L_1-L}{L}\leqslant(0.7\sim0.75)\delta$$

式中，L_1 为变形后沿截面的材料长度，mm；L 为变形前沿截面材料长度，mm；δ 为材料的伸长率。

如果计算结果符合上述条件，则可以一次完成胀形；如果不符合上述条件，则先制成半球形过渡形状，然后再压出所需的工件形状，如图 3.5-3 所示。



(a) 预成形　　(b) 最后成形

图 3.5-3　压凸包成形

图 3.5-4 为冲制加强肋时材料的伸长率曲线。曲线 1 是伸长率的计算值，划斜线部分是实际伸长率，由于靠近加强肋处的材料也承受拉伸，故其值略低。

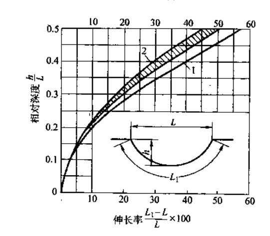


图 3.5-4　冲制加强肋时材料的伸长率

表 3.5-1 所列为起伏间的距离和起伏距边缘的极限尺寸。

表 3.5-1　起伏间的距离和起伏距边缘的极限尺寸

mm

简　图	D	L	l
（图：D，L，l，$(1.5\sim2)t$，15°～30°）	6.5	10	6
	8.5	13	7.5
	10.5	15	9
	13	18	11
	15	22	13
	18	26	16
	24	34	20
	31	44	26
	36	51	30
	43	60	35
	48	68	40
	55	78	45

一般说来，材料的伸长率越大，可能达到的极限变形程度愈大。另外，材料较大的硬化指数，圆滑而光洁的冲模工



作表面和良好的润滑，都有利于极限变形程度的提高。用球形凸模成形可能得到更大的深度。但是，具有棱角过渡的圆锥形凸起相对于平底具有更大的刚性。

如凸肋与边缘的距离小于（3～5）t 时，在成形中由于边缘的收缩，故需考虑增加切边余量。

在直角形零件上压肋的形式见图 3.5-5，其尺寸见表 3.5-2。

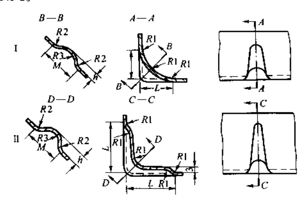


图 3.5-5 直角形零件压肋的形式

表 3.5-2 直角形零件压肋的尺寸 mm

L	肋的类型	R_1	R_2	R_3	h	M	肋的间距
13	Ⅰ	6	9	5	3	18	64
19	Ⅰ	8	16	7	5	29	76
32	Ⅱ	9	22	8	7	38	89

压制加强肋所需的力近似地按下式计算：

$$F = Lt\sigma_b k$$

式中，F 为压制加强肋时所需的力，N；L 为加强肋长度，mm；σ_b 为材料的抗拉强度，MPa；k 为系数，与肋的宽度及深度有关，在 0.7～1 之间；t 为料厚，mm。

在曲柄压机上用薄料（$t < 1.5$ mm）对小零件（面积 < 2 000 mm²）作起伏成形时，其压力可用以下经验公式计算：

$$F = AKt^2$$

式中，A 为起伏成形的面积，mm²；K 为系数，对于钢为 200～300 N/mm²，黄柄为 150～200 N/mm²；t 为料厚，mm。

（2）圆柱形空心坯料的胀形

圆柱形空心坯料的胀形是将直径较小的空心零件或管毛坯，在半径方向上向外扩张的冲压工序。胀形一般要用可分式凹模，其凸模有下列形式：

1）橡胶（或聚氨酯）凸模（图 3.5-6）。

2）分块式凸模，由楔状心块将其分开（图 3.5-7）。

3）用液体作为凸模（图 3.5-8）。这种方法有的可以直接将液体倒入毛坯内，但此法操作不便且生产率低。有的可用装在凸模上的充满液体的橡胶囊。

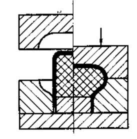


图 3.5-6 用橡胶凸模的胀形模

由于聚氨酯橡胶优良的物理机械性能，用它作为工作介质的胀形得到愈来愈广泛的应用。图 3.5-9 即为用聚氨酯橡胶作自行车中接头成形的例子。

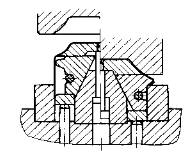
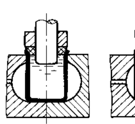
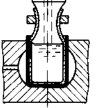


图 3.5-7 用分块式凸模的胀形模





(a)用倾注液体的方法　(b) 用充液橡胶囊

图 3.5-8 用液体作为凸模的胀形

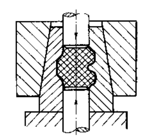


图 3.5-9 用聚氨酯橡胶棒的胀形

此零件过去用板料经热冲压或用精密铸造成形。其工艺流程长，生产条件恶劣，质量难于保证。而用聚氨酯胀形，外观质量好，尺寸精度好，合格率高，生产效率高，劳动条件改善，将逐步代替板料红冲和精密铸造。

（3）胀形变形程度的计算

作为胀形的毛坯，一般已经过几次拉深工序，金属已有冷作硬化现象，故在胀形前应退火。毛坯上的擦伤、划痕、皱纹等缺陷也易导致毛坯的拉裂。胀形时的变形程度可用胀形系数表示：

$$K = \frac{d_{max}}{d}$$

式中，d_{max} 为胀形后的最大直径；d 为圆筒毛坯的直径。

表 3.5-3 所列为胀形系数的近似数值。

在对毛坯径向施加压力的同时，若也在轴向加压，则胀形的变形程度可以增大。对毛坯进行局部加热（变形区加热）会显著增大可能的变形程度。铝管毛坯胀形时，由实验确定的胀形系数如表 3.5-4。



表 3.5-3　胀形系数的近似数值

材料	毛坯相对厚度 $\frac{t}{D}\times 100$			
	0.45～0.35		0.32～0.28	
	未退火	退火	未退火	退火
10 号钢	1.10	1.2	1.05	1.15
铝	1.2	1.25	1.15	1.2

表 3.5-4　铝管毛坯的胀形系数

胀形方法	极限胀形系数 K
用橡皮的简单胀形	1.2～1.25
用橡皮并对毛坯轴向加压的胀形	1.6～1.7
局部加热至 200～250℃时的胀形	2.0～2.1
加热至 380℃用锥形凸模的端部胀形	～3.0

（4）胀形力

胀形时，其胀形力可按下式计算：

$$F = pA$$

式中，F 为胀形力，N；p 为胀形单位压力，MPa；A 为胀形面积，mm^2。

胀形单位压力 p 可用下式计算：

$$p = 1.15\sigma_z \frac{2t}{D}$$

式中，p 为胀形单位压力，MPa；σ_z 为胀形变形区真实应力，近似估算时取 $\sigma_z \approx \sigma_b$（材料的抗拉强度），MPa；$D$ 为胀形最大直径，mm；t 为材料原始厚度，mm。

1.2　翻边

翻边是在成形坯料的平面部分或曲面部分上，使板料沿一定的曲线翻成竖立边缘的成形方法。

按变形的性质，翻边可分为伸长类翻边和压缩类翻边。伸长类翻边，坯料变形区为双向拉应力状态，沿切向作用的拉应力是最大主应力。在该方向发生伸长变形，其成形极限主要受变形区坯料边缘开裂的限制。压缩类翻边，坯料变形区为切向受压、径向受拉的应力状态，沿切向作用的压应力为绝对值最大主应力，在该方向发生压缩变形。变形区失稳起皱是限制其成形极限的主要因素。

按翻边坯料的状况，翻边可分为平面翻边和曲面翻边。当翻边是在平面坯料或坯料的平面部分进行时，叫做平面翻边。当翻边是在曲面坯料成坯料的曲面部分进行时，叫做曲面翻边。

（1）平面翻边

1）圆孔翻边

① 变形分析。圆孔翻边见图 3.5-10。翻边前，坯料一般要预先冲孔，直径为 d_0。翻边时，坯料在凸模作用下，孔径 d_0 不断扩大，最后变为直径为 d_1 的竖边。翻边变形区是内径为 d_0、外径为 d_1 的环形部分，为双向拉应力状态，且切向拉应力一般为最大主应力。孔边缘仅受切向拉应力作用，为单向应力状态。坯料变形区切向发生伸长变形，属伸长类翻边。变形坯料厚度变薄，孔边缘切向伸长变形最大，厚度变薄最严重。翻边后，孔边缘厚度 t 近似按下式确定

$$t = t_0\sqrt{\frac{d_0}{d_1}}$$

式中，t_0 为变形坯料原始厚度。

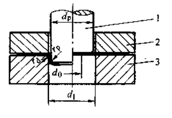


图 3.5-10　圆孔翻边

1—凸模；2—压边圈；3—凹模

当变形程度过大时，孔边缘首先发生裂纹。翻边过程中，变形区在径向略有收缩，因此，翻边后零件的翻边高度较原变形区的环形部分宽度略有减小。

② 成形极限。圆孔翻边的变形程度，一般用坯料预冲孔直径 d_0 与翻边后的孔径 d_1 的比值表示，称为翻边系数，即

$$K = \frac{d_0}{d_1}$$

翻边系数越小，表示变形程度越大。由式

$$t = t_0\sqrt{\frac{d_0}{d_1}} = t_0\sqrt{K}$$

可见，翻边系数越小，板料边缘变薄越严重。当翻边系数小到使孔的边缘濒于破裂时的翻边系数称为极限翻边系数。

扩孔试验是比较材料圆孔翻边成形性能常用的试验方法。试验时，用带有内孔 d_0 的圆形毛坯在图 3.5-11 所示的模具上进行扩孔，直至孔边缘出现裂纹为止，测定此时的内孔直径 d_f，以下式计算极限扩孔系数 λ，亦称 KWI 值

$$\lambda = \frac{d_f - d_0}{d_0} \times 100\%$$

λ 值的大小可直接评价板材的翻边性能，该值越大，表明材料翻边性能越好。

应当注意到，λ 值受板厚、内孔直径及孔边缘状态影响较大。

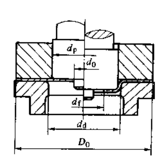


图 3.5-11　扩孔试验模具

扩孔试验参数见表 3.5-5。

表 3.5-5　扩孔试验参数　　mm

料厚 t_0	坯料直径 D_0	内孔直径 d_0	凸模直径 d_p	凹模直径 d_d
>2	>90	16.5	55	61
<2	>70	12.0	40	44
0.2～1.0	>50	7.5	25	27
0.2～1.0	>25	4.0	12	14

影响圆孔翻边极限翻边系数的主要因素及提高变形程度



的主要措施如下。

孔边缘状态圆孔翻边对孔边缘状态反应最敏感。对于冷轧低碳钢板，冲裁边缘的伸长变形能力比切削边缘减少30%～80%。由于冲裁边缘产生的加工硬化层、表面的凸凹不平乃至微小裂纹的存在等原因，使其伸长变形能力相对于母材大大下降（图 3.5-12）。

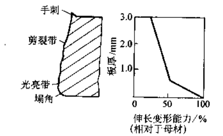


图 3.5-12 冲裁断面伸长变形能力分布

不同材料切削边缘的伸长变形能力大体相同，而冲裁边缘的伸长变形能力却有相当大的差别。一般，冲裁边缘的伸长变形能力随材料的塑性的提高而增加。

改善毛坯冲裁加工条件可有效地提高其以后的翻边变形能力。由图 3.5-13 可见，随着间隙的增加，扩孔极限下降，在 50%t 左右时，达最小值。以后，随着间隙的增加，扩孔极限再度上升。当冲裁模刃口变钝时，所得毛坯在以后的翻边中变形能力有所下降。

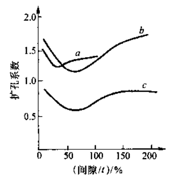


图 3.5-13 冲孔间隙对扩孔系数的影响

a—热轧钢板（$t=3.2$ mm）；b—镇静钢（$t=0.8$ mm）；
c—沸腾钢（$t=0.8$ mm）；t—板厚

为了提高冲裁边缘的翻边变形能力，可考虑以切削孔、钻孔代替冲孔，也可对坯料退火以消除硬化。以铲刺或刮削的方法去除毛刺也可提高材料变形能力。实验结果表明，切削余料是料厚的 15%时就可恢复其拉伸变形能力。采用图 3.5-14 所示的压印法，从毛刺一侧压缩挤光剪裂带，可提高材料延伸率 1 倍左右，是改善孔边缘状态的有效方法。使翻边方向与冲孔方向相反，也可提高材料翻边变形能力。像图 3.5-15 那样，由坯料一侧预先稍加翻边，然后由相反一侧用圆锥凸模再翻边，可提高翻边极限。在允许边缘折痕的情况下，可能得到与切削边缘相同的翻边系数。

a）凸模形状：由图 3.5-16 可以看出，凸模是平底的、球底的、圆锥底的，材料的扩孔系数依次上升，这主要是由于孔边颈缩数量增加的原因。

b）板厚：随着板厚的增加，扩孔系数提高（图 3.5-16）。

c）材料力学性能：由于圆孔翻边属伸长类成形，其破坏方式为边缘开裂，因此材料的塑性是限制其成形极限的主要因素。圆孔边缘切向伸长变形最大，其值为：

$$\varepsilon_\theta=\frac{d_1-d_0}{d_0}=\frac{1}{K}-1\leqslant\delta$$

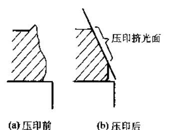


图 3.5-14 压印法

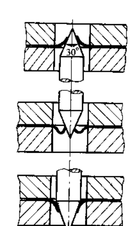


图 3.5-15 反向再翻边

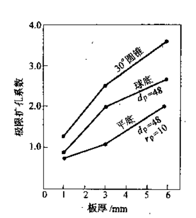


图 3.5-16 凸模形状及板厚对极限扩孔系数的影响（翻边坯料为切削孔）

由上式可见，圆孔翻边时的极限翻边系数与材料伸长率 δ 成反比例关系。但实际上，由于伸长变形较小的邻区对具有最大伸长变形的边缘的影响，使后者塑性变形的稳定性得到加强，因而翻边时毛坯边缘部分可能得到比简单拉伸时大的伸长变形。即上式中用的 δ 值通常大于在简单拉伸中所得到的均匀伸长率。

常用材料的极限翻边系数见表 3.5-6 及表 3.5-7。

翻边边缘残留弯曲变形（图 3.5-17）是圆孔翻边常出现的质量缺陷。这主要是由于翻边变形终了时，径向拉应力不足造成的。生产中，采用较小的翻边模间隙对直边施以挤薄是消除此种缺陷的有效措施。

表 3.5-6　低碳钢的极限翻边系数 K

翻边方法	孔的加工方法	比值 d_0/t										
		100	50	35	20	15	10	8	6.5	5	3	1
球形凸模	钻后去毛刺	0.70	0.60	0.52	0.45	0.40	0.36	0.33	0.31	0.30	0.25	0.20
	用冲孔模冲孔	0.75	0.65	0.57	0.52	0.48	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	—
圆柱形凸模	钻后去毛刺	0.80	0.70	0.60	0.50	0.45	0.42	0.40	0.37	0.35	0.30	0.25
	用冲孔模冲孔	0.85	0.75	0.65	0.60	0.55	0.52	0.50	0.50	0.48	0.47	—

表 3.5-7　其他一些材料的翻边系数

退火的材料	翻边系数	
	K	K_{min}
白铁皮	0.70	0.55
黄铜 H62 $t=0.5\sim6$ mm	0.68	0.62
铝 $t=0.5\sim5$ mm	0.70	0.64
硬铝	0.89	0.80

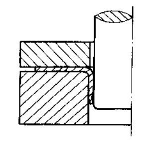


图 3.5-17　翻边边缘残留弯曲变形

③ 坯料尺寸确定。翻边的工艺计算主要是确定预制孔直径的大小。当翻边高度较小时，可先在坯料上预制孔，然后直接翻边（图 3.5-18）。由于翻边过程中，材料变形区主要在切向发生伸长变形和厚度变薄，而径向变形不大。因此，可以用简单弯曲的方法，按下式确定预制孔直径：

$$d_0=d_1-2(H-0.43r-0.22t)$$

式中，d_0 为预制孔直径，mm；d_1 为翻边后所得竖边直径，mm；H 为翻边后零件高度，mm；r 为零件圆角半径，mm；t 为坯料厚度，mm。

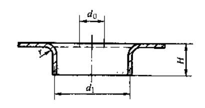


图 3.5-18　预制孔－翻边

当翻边高度过大，即翻边系数小于极限翻边系数时，已不能用上述直接翻边方法。此时可采用变薄翻边或拉深－冲底孔－翻边的方法（图 3.5-19）。

当采用拉深－冲底孔－翻边的工艺方法时，可先计算翻边所能达到的最大高度，然后根据翻边高度及制件高度来确定拉深高度。

可以达到的最大翻边高度 h 可由下式确定：

$$h=\frac{d_1}{2}(1-K)+0.57r$$

此时，预制孔直径 d_0 为

$$d_0=Kd_1$$

拉深高度 h' 为

$$h'=H-h+r+t$$

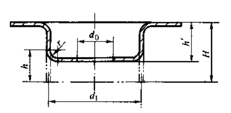


图 3.5-19　拉深－冲底孔－翻边

④ 翻边力计算。翻边力一般不是很大，其与凸模型式及凸、凹模间隙有关，当使用平底凸模时，翻边力（N）可按下式计算：

$$P=1.1\pi t(d_1-d_0)\sigma_b$$

式中，σ_b 为材料抗拉强度，MPa；d_0 为预制孔直径，mm；d_1 为翻边后竖边直径，mm；t 为材料厚度，mm。

使用球底凸模时，翻边力（N）按下式计算：

$$P=1.2\pi d_1 tm\sigma_b$$

式中，m 为系数，其值可由表 3.5-8 确定，其他符号与上式同。

表 3.5-8　m 值

翻边系数 K	m	翻边系数 K	m
0.5	0.20～0.25	0.7	0.08～0.12
0.6	0.14～0.18	0.8	0.05～0.07

无预制孔的翻边力比有预制孔的翻边力大 1.33～1.75 倍。

⑤ 凸、凹模间隙。凸、凹模单边间隙可取为（0.75～0.85）×t，也可按表 3.5-9 选取。

表 3.5-9　翻边凸、凹模单面间隙　　mm

料厚	平坯料翻边	拉深后翻边
0.3	0.25	—
0.5	0.45	—
0.7	0.60	—
0.8	0.70	0.60
1.0	0.85	0.75
1.2	1.00	0.90
1.5	1.30	1.10
2.0	1.70	1.50



2）非圆孔翻边。如图 3.5-20 所示的孔，其边缘由内凹曲线、外凸曲线及直线构成，在工艺计算时要分别考虑。对内凹曲线部分，可看作是圆孔的一部分，属伸长类翻边。当 $\alpha \leqslant 180°$时，由于邻近金属的影响，其变形程度较圆孔将有所提高。该部分翻边系数可由下式确定：

$$K' = \frac{K\alpha}{180°}$$

式中，K 为圆孔极限翻边系数，可查表 3.5-6、表 3.5-7；α 为曲线部分夹角，(°)。

当 $\alpha > 180°$时，相邻部分金属的影响已不明显，此时应按圆孔翻边的极限翻边系数判断其变形的可能性。

对于低碳钢板，α 不同时的翻边系数也可由表 3.5-10 确定。

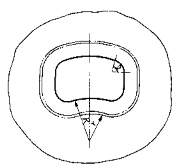


图 3.5-20 非圆孔翻边

表 3.5-10 低碳钢内凹曲线翻边系数

α/ (°)	坯料相对厚度 t/d_0						
	0.02	0.03	0.05	0.08～0.12	0.15	0.20	0.30
>180	0.80	0.60	0.52	0.50	0.48	0.46	0.45
165	0.73	0.55	0.48	0.46	0.44	0.42	0.41
150	0.67	0.50	0.43	0.42	0.40	0.38	0.375
135	0.60	0.45	0.39	0.38	0.36	0.35	0.34
120	0.53	0.40	0.35	0.33	0.32	0.31	0.30
105	0.47	0.35	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26
90	0.40	0.30	0.26	0.25	0.24	0.23	0.225
75	0.33	0.25	0.22	0.21	0.20	0.19	0.185
60	0.27	0.20	0.17	0.17	0.16	0.15	0.145
45	0.20	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11
30	0.14	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
15	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

外凸曲线部分类似于浅拉深，属压缩类翻边，此时的翻边系数实质上就是拉深系数，并用下式表示：

$$K'' = \frac{r}{R}$$

式中，r 为翻边线曲率半径，mm；R 为孔边缘曲率半径，mm。

K''的选用可参考本篇第 4 章的拉深系数。

直边部分可近似按弯曲变形考虑。

在确定翻边前预制孔的形状和尺寸时，对这三部分应分别按圆孔翻边、拉深及弯曲设计。对内凹曲线部分的宽度应比直边部分宽度增大 5%～10%，以弥补其翻边后高度的减小。最后对计算结果适当修正，使各段圆滑连接。

3）外缘翻边。按变形性质，外缘翻边可分为内凹曲线翻边和外凸曲线翻边两种。

内凹曲线翻边（图 3.5-21）属伸长类翻边，其翻边系数可由下式确定：

$$K' = \frac{r}{R}$$

K'可参考表 3.5-10 选取。

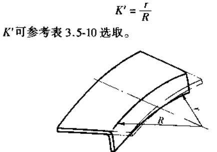


图 3.5-21 内凹曲线翻边

影响内凹曲线翻边成形极限的主要因素及提高成形极限采取的措施参考圆孔翻边部分。

内凹曲线翻边除易产生翻边边缘残留弯曲变形（图 3.5-17）外，由于变形区切向的弹复造成平面部分翘起（图 3.5-22）也是常见缺陷之一。在可能情况下，采用翻边与拉深或胀形的复合变形可减轻此种缺陷。

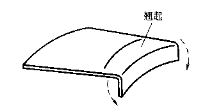


图 3.5-22 翘起

当曲线夹角 $\alpha > 150°$时，可按圆孔翻边确定坯料尺寸。当 $150° > \alpha > 60°$时（图 3.5-23），为了得到平齐一致的翻边高度，已不能按曲率半径 r 确定毛坯尺寸。实验表明，随着翻边系数的减小，曲率半径 ρ 及角度 β 增大。此时可参考表 3.5-11 进行坯料修正。

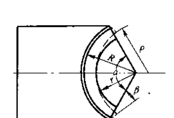


图 3.5-23 内凹曲线翻边的坯料修正

表 3.5-11 内凹曲线翻边坯料修正值

α/ (°)	翻边系数 K'	β/ (°)	ρ/mm
150	0.62	25	10.0
120	0.50	30	17.5
120	0.37	30	20.0
120	0.34	47	26.0
90	0.25	38	65.0
85	0.40	38	32.0
70	0.43	32	35.0
60	0.25	30	+∞

注：材料 08，料厚 1 mm，$2r = 32.5$ mm。

当 $\alpha < 60°$时，曲率半径 ρ 变为无穷大，坯料的尺寸及形状可按弯曲变形进行计算。

外凸曲线翻边（图 3.5-24）类似于无压边的拉深变形，属压缩类翻边，其翻边系数为

$$K''=\frac{r}{R}$$

式中，r 为翻边线曲率半径，mm；R 为坯料曲率半径，mm。K''可参考本篇第 4 章的拉深系数选取。

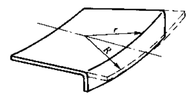
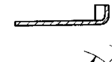


图 3.5-24　外凸曲线翻边

同样，由于变形分布不均，外凸曲线翻边也应进行坯料修正，修正方向与内凹曲线翻边相反（图 3.5-25）。



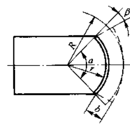


图 3.5-25　外凸曲线翻边坯料修正

当内凹曲线翻边的变形程度用 $E'=\frac{b}{r}$ 表示，外凸曲线翻边的变形程度用 $E''=\frac{b}{R}$ 表示时，各种材料的极限变形程度可由表 3.5-12 确定。

表 3.5-12　外缘翻边材料允许变形程度

材　料		$E'/\%$		$E''/\%$	
		橡胶成形	刚模成形	橡胶成形	刚模成形
铝合金	L4M	6	40	25	30
	L4Y1	3	12	5	8
	LF21M	6	40	23	30
	LF21Y1	3	12	5	8
	LF2M	6	35	20	25
	LF2Y1	3	12	5	8
	LY12M	6	30	14	20
	LY12Y	0.5	9	6	8
	LY11M	4	30	14	20
	LY11Y	—	—	5	6
黄铜	H62 软	8	45	30	40
	H62 半硬	4	16	10	14
	H68 软	8	55	35	45
	H68 半硬	4	16	10	14
钢	10	—	10	—	38
	20	—	10	—	22
	1Cr18Ni9 软	—	10	—	15
	1Cr18Ni9 硬	—	10	—	40
	2Cr18Ni9	—	10	—	40

在计算外缘翻边的翻边力（N）时，为简化计算，可看作带压边的单边弯曲，由下式确定

$$P=1.25Lt\sigma_b K$$

式中，L 为翻边线长度，mm；t 为料厚，mm；σ_b 为材料抗拉强度，MPa；K 为系数，近似为 0.2～0.3。

4）变薄翻边。变薄翻边是在翻边时，在模具作用下使翻边的竖边变薄的翻边方法。变薄翻边不但能增加翻边高度，而且使零件表面光洁，尺寸精度高，厚度均匀。

变薄翻边时，变形程度与材料塑性有关，一道工序可达到的变形程度为$\frac{t_1}{t_0}=0.4\sim0.5$，甚至更大。变薄翻边高度按体积不变原理计算。

变薄翻边常用于平坯料或半成品的工件上冲制 M5 以下的小螺纹底孔，如图 3.5-26 所示。对于低碳钢、黄铜、紫铜和铝的普通螺纹底孔翻边有关尺寸可按表 3.5-13 选取。

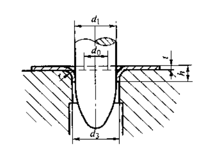


图 3.5-26　变薄翻边

表 3.5-13　普通螺纹底孔翻边有关尺寸

螺纹直径	t	d	d_1	h	d_3	r
M2	0.8	0.8	1.6	1.6	2.64	0.2
	1.0			2.0	2.9	0.4
M2.5	0.8	1	2.1	1.7	3.15	0.2
	1.0			2.1	3.4	0.4
M3	0.8	1.2	2.5	1.8	3.54	0.2
	1.0			2.2	3.8	0.4
	1.2			2.4	4.06	
	1.5			3.0	4.45	
M4	1.0	1.6	3.3	2.4	4.6	0.4
	1.2			2.8	4.86	
	1.5			3.3	5.25	
	2.0			4.2	5.9	0.6

（2）曲面翻边

1）伸长类曲面翻边

① 变形分析。伸长类曲面翻边系指在坯料或零件的曲面部分，沿其边缘向曲面的曲率中心相反的方向翻起与曲面垂直竖边的成形方法❶（图 3.5-27）。

翻边过程中，成形坯料的圆弧部分与直边部分的相互作用，是引起圆弧部分产生切向伸长变形，使直边部分产生剪切变形和使坯料底面产生切向压缩变形的最主要原因。因此，

❶ 在管类零件一端成在弧度大于 $\pi/2$ 的曲面上，翻起与曲面垂直的竖边的成形方法，也可视为曲面翻边，但其变形特点、成形方法及模具结构与这里讨论的曲面翻边均有所不同。对该类曲面翻边本章未予介绍。

凡是对圆弧部分与直边部分之间相互作用有影响的因素，也必然会影响坯料的上述三个部分产生的三种形式的变形。当然，也一定会影响冲压件质量及其成形极限。

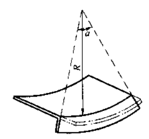
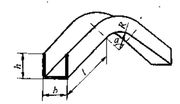


图 3.5-27 伸长类曲面翻边

影响圆弧部分切向变形的主要因素有：翻边高度 h、直边部分长度 l、零件曲率半径 R 及模具几何形状等（有关尺寸见图 3.5-28）。



面 3.5-28 伸长类曲面翻边典型零件

a）翻边高度 h 的影响。由图 3.5-29 可以看出，翻边后在竖边高度上切向变形的分布，基本上接近于直线的规律，而其数值在竖边的边缘上具有最大值，在靠近坯料底面的位置上最小。随着比值 l/R 的增大，翻边高度对切向变形的影响也越加显著。但是，当比值 $l/R=0$ 时，即当不存在直边时，最大切向变形数值基本上保持不变（$R=70$）或者降低（$R=30$）。

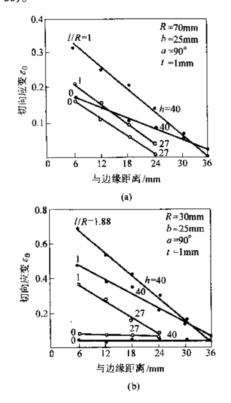


图 3.5-29 h 及 l 对切向变形的影响

b）直边长度 l 的影响。由图 3.5-29 可见，随着 $\frac{l}{R}$ 的增加，圆弧部分的切向变形显著增大。这主要由于直边长度 l 对直边部分剪切变形的影响，而导致了圆弧部分切向变形的变化。

c）底面宽度 b 的影响。由图 3.5-30 可以看出，底面宽度 b 增大时，竖边切向伸长变形也增大。这种结果主要是由于底面宽度的不同对其本身的切向压缩变形的影响，而导致竖边切向伸长变形的变化。

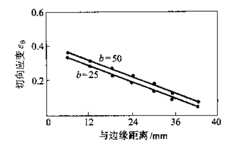


图 3.5-30 底面宽度 b 对切向变形的影响

d）凹模曲率半径 R_d 的影响。图 3.5-31 是凹模曲率半径 R_d 不同时，零件圆弧部分对称中心线上切向应变及其分布曲线。由图可知，当凹模曲率半径大于凸模曲率半径时（$R_d > R_p$），切向变形有所降低。而当 $R_d < R_p$ 时，切向变形数值显著地增大。这主要是由于 $R_d > R_p$ 时，改善了毛坯在翻边时的变形条件。

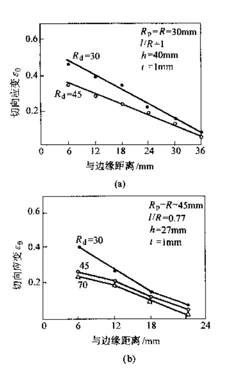


图 3.5-31 凹模曲率半径 R_d 对切向变形的影响

② 成形极限。伸长类曲面翻边的成形极限用极限相对翻边高度表示，即用坯料不产生破坏的条件下可能达到的最大翻边高度 h_{cr} 与圆弧部分的曲率半径 R 的比值 h_{cr}/R 表示。表 3.5-14 与图 3.5-32 为冷轧低碳钢板、黄钢及铝板的极限相对翻边高度。

表 3.5-14　伸长类曲面翻边成形极限 h_{cr}/R

材料	R/mm	$\frac{l}{R}$						
		0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	>2
低碳钢板	30	—	—	—	1.33	1.3	1.25	1.25
	45	—	—	—	1.27	1.22	1.22	1.22
黄铜板 H62	30	—	—	—	1.25	1.2	1.16	1.16
	45	—	—	—	1.22	1.16	1.05	1.05
纯铝板	30	—	—	—	0.83	0.8	0.66	0.66
	45	—	1.38	—	0.77	0.77	0.77	0.77
	70	0.86	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82

注：此表适于 $\alpha=90°$。

由图 3.5-32 可见，极限相对翻边高度 h_{cr}/R 的数值决定于直边部分的长度 l。当直边长度大于某一极限值后（$l>2R$），极限相对翻边高度 h_{cr}/R 成为一个基本不变的恒定数值。当直边部分长度小于某一极限值时，极限相对翻边高度 h_{cr}/R 的数值急速地增大，并且当直边长度接近于零时，可能会出现翻边高度不受限制的情况，即成形任何高度的竖边也不致出现开裂的问题。

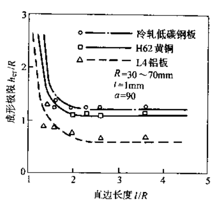


图 3.5-32　伸长类曲面翻边成形极限

$\alpha=90°$时，伸长类曲面翻边的成形极限也可由下式确定。

低碳钢板

当$\frac{l}{R}>1.2$时，$h_{cr}=(1.2\sim1.3)R$

当$\frac{l}{R}<1$时，$h_{cr}=\infty$

黄铜板

当$\frac{l}{R}>1.2$时，$h_{cr}=(1\sim1.25)R$

当$\frac{l}{R}<1$时，$h_{cr}=\infty$

纯铝板

当$\frac{l}{R}>0.8$时，$h_{cr}=(0.7\sim1.2)R$

当$\frac{l}{R}<0.5$时，$h_{cr}=\infty$

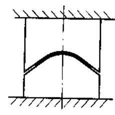
③ 伸长类曲面翻边零件常见缺陷及预防措施。伸长类曲面翻边零件常见缺陷及预防措施见表 3.5-15。

④ 模具设计原则。伸长类曲面翻边模具的基本构造见图 3.5-33。在进行模具设计时应注意下面几点。

a) 翻边后零件形状决定于凸模尺寸。所以凸模曲率半径 R_p 与圆角半径 r_p 应等于零件的相应尺寸。

表 3.5-15　伸长类曲面翻边常见缺陷及预防措施

质量缺陷	产生原因	预防措施
边缘开裂	圆弧部分切向伸长变形过大	1. 减小相对翻边高度，使之不超过 h_{cr}/R 2. 允许情况下，取 $R_d>R_p$
侧边起皱	侧边剪切应力引起	取较小的凸、凹模间隙，一般取单面间隙 $z<t_0$
底面起皱	底面诱发压应力引起	采取底面压边装置



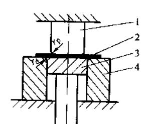


图 3.5-33　伸长类曲面翻边模具结构

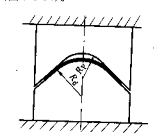
1—凸模；2—坯料；3—压料板；4—凹模

b) 为防止坯料侧壁起皱，提高零件质量，应取凸、凹模单边间隙值等于或略小于料厚。同时，为保证原设计间隙不变，应保证凹模与模座间的可靠固定。

c) 底面的压边是必不可少的，这可有效地防止底面由于切向压应力引起的起皱。

d) 凹模圆角半径 r_d，虽然不决定零件形状，但对成形过程中坯料的变形有较大影响。应取尽量大的圆角半径，一般应保证 $r_d>8t$。

e) 当凹模曲率半径大于凸模曲率半径时（$R_d>R_p$），可有效地降低圆弧部分切向应变的数值。因而，在允许时，宜取 $R_d>R_p$（图 3.5-34）。



面 3.5-34　$R_d>R_p$ 时模具示意图

f) 在设计模具时，也必须注意凸模对坯料的冲压方向。即在成形时，应使坯料处于便于成形的位置。在对称形状零件翻边时，当然应使坯料或零件的对称轴线与凸模轴线相重合。如果零件的形状不是对称的，应使成形后零件在模具中的位置保证两直边部分与凸模轴线所成的角度相同，如图 3.5-35 所示 N 向。如果两直边长度不等，可能出现较大的水平方向的侧向力。所以，在模具上应考虑设置侧向力的平衡装置。

2) 压缩类曲面翻边

① 变形分析。压缩类曲面翻边是指在坯料或零件的曲面部分，沿其边缘向曲面的曲率中心方向翻起竖边的成形方法（图 3.5-36）。翻边坯料变形区内绝对值最大的主应力是沿切向（翻边线方向）的压应力，在该方向产生压缩变形，



并主要发生在圆弧部分，易在这里发生失稳起皱，这是限制压缩类曲面翻边成形极限的主要原因。因而，减小圆弧部分的压应力，防止侧边的失稳起皱的发生，是提高压缩类曲面翻边成形极限的关键。与圆弧部分相毗连的直边部分，由于与圆弧部分的相互作用，发生了明显的剪切变形，而这一剪切变形又使圆弧部分的切向压缩变形发生了变化。因此，直边部分的存在与否及大小将直接影响压缩类曲面翻边的成形极限。

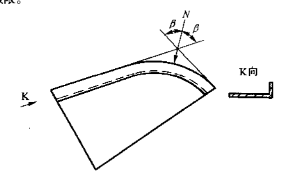


图 3.5-35　曲面翻边时冲压方向的选择

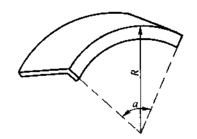


图 3.5-36　压缩类曲面翻边

影响圆弧部分切向变形的主要因素有：坯料直边长度 l、零件底面宽度 b、翻边高度 h、曲率半径 R 及凹模曲率半径 R_d 等（有关尺寸见图 3.5-37）。

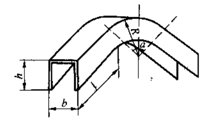


图 3.5-37　压缩类曲面翻边典型零件

a）直边长度 l 的影响。由图 3.5-38 可见，l 不同，侧边高度方向切向变形的分布趋势基本相同，但随着 l 的增大，可能出现的最大变形量却明显增加。这主要是由于 l 的变化改变了直边部分剪切变形对圆弧部分切向压缩变形的影响。

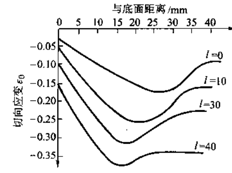


图 3.5-38　直边长度 l 对切向变形的影响

b）底面宽度 b 的影响。由图 3.5-39 可见，随着 b 的增大，最大切向应变也增大。这主要由于 b 的变化，改变了其本身切向及宽向的应变的大小，进而对侧边切向应变产生影响。

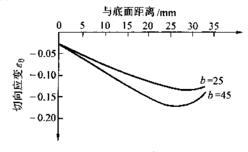


图 3.5-39　底面宽度 b 对切向变形的影响

c）翻边高度 h 的影响。由图 3.5-40 可以看出，当翻边高度较小时，圆弧部分的切向压缩变形随翻边高度的增大而线性增加，竖边边缘上压缩变形最大。当翻边高度较小时，圆弧部分切向压缩变形先线性增大，达最大值后又逐渐减小。翻边高度较大时，可能出现的最大切向压缩变形有所减小。

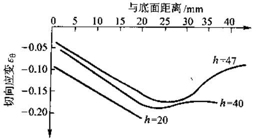


图 3.5-40　翻边高度 h 对切向变形的影响

d）曲率半径 R 的影响。由图 3.5-41 可以看出，随着 R 的增大，可能出现的最大切向应变减小，且沿高度方向分布更加均匀。

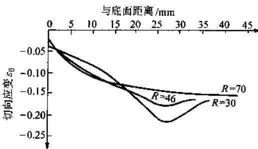


图 3.5-41　曲率半径 R 对切向变形的影响

e）凹模曲率半径 R_d 的影响。由图 3.5-42 可见，当凹模曲率半径大于凸模曲率半径时（$R_d > R_p$），圆弧部分最大切向应变得到很大程度减轻，并使变形沿高度方向的分布趋于均匀。

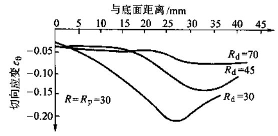


图 3.5-42　凹模曲率半径 R_d 对切向变形的影响



② 成形极限。压缩类曲面翻边的成形极限用极限翻边高度表示，即侧边不起皱的条件下，可能得到的最大翻边高度 h_{cr}。

无两侧压边时，纯铝板的极限翻边高度见表 3.5-16 及图 3.5-43。因翻边高度较小，直边长度 l 无明显影响。

表 3.5-16　铝板无侧压边极限翻边高度 h_{cr}

直边长度	$R=30$		$R=45$		$R=70$	
	$b=25$	$b=45$	$b=25$	$b=45$	$b=25$	$b=45$
$l=0$	5.5	4.5	6.0	5.0	6.5	5.5
$l=10$	5.5	4.5	6.0	5.0	7.5	6.0
$l=20$	5.5	4.5	6.0	5.0	—	6.5
$l=30$	5.5	4.5	6.0	5.0	—	6.5

注：此表适于 $\alpha=90°$

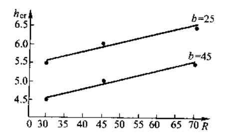


图 3.5-43　铝板无侧压边翻边极限（$\alpha=90°$）

③ 压缩类曲面翻边常见缺陷及预防措施。压缩类曲面翻边常见缺陷及预防措施见表 3.5-17。

表 3.5-17　压缩类曲面翻边常见缺陷及预防措施

质量缺陷	产生原因	预防措施
底部两圆角翘起	1）底面压料力不足 2）上模回程时，底面压料力没有及时卸除（特别是有两侧压边时）	1）保证足够的底面压料力 2）翻边结束后，上模回程时，及时卸除底面压料力 3）加强凹模与坯料间润滑
底面两端凸起	底面压料力不足	模具设计时，必须考虑底面压料装置。并保证足够压料力
侧边起皱	切向压应力所致	1）选用较小的凸、凹模间隙，可使之等于料厚 2）翻边高度较大时，应采用带两侧压边的模具结构 3）可使凹模曲率半径大于凸模曲率半径
侧边边缘畸变	翻边接近接束时，径向拉应力不足而使坯料侧边边缘的弯曲变形保留下来	取较小的凸、凹模间隙及较大的凹模圆角半径
翻边高度不均	侧边的切向压缩变形和高度方向的伸长变形不均匀	坯料修正

④ 模具设计几项原则。压缩类曲面翻边模具基本结构见图 3.5-44。进行模具设计时，一般应注意如下几项原则。

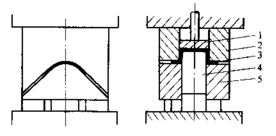


图 3.5-44　压缩类曲面翻边模具结构
1—压料板；2—凹模；3—坯料；4—凸模；5—侧压边

a）零件的形状决定于凸模尺寸。因此，应使凸模尺寸与零件相应尺寸相等。

b）凹模曲率半径尽管与零件形状无关，但对坯料的变形却有重要影响。从变形考虑，可取 $R_d > R_p$。

c）底面压料是压缩类曲面翻边必不可少的条件。除选择合理的结构形式外，还应保证足够的压料力。并应保证上模回程时，底面压料力能及时卸除。

d）当零件翻边高度较大时，应采用带两侧压边的模具结构，以防止变形过程中侧边的起皱。

e）模具应保证足够的刚度，特别是凹模与模板的可靠固定，以保证模具间隙不致在翻边过程中因侧向力的作用而增大。

f）模具设计时应注意冲压方向的选择，原则上可参考伸长类曲面翻边。

(3) 翻管工艺

近年来，出现了将无缝管材翻卷成双层管或多层管的翻管工艺，其制品如图 3.5-45 所示。这是一种从翻边工艺发展起来的新型成形工艺。翻管工艺是一个复杂且连续的变形过程，如图 3.5-46 所示，在翻管力 P 的作用下，从扩口变形逐渐转化到卷曲变形，进而转化到翻卷变形。要保证变形过程中的顺利转化，主要的工艺参数应是翻管力 P，模具半锥角 α，管材的相对厚度 t/D 和管材的塑性及强度。

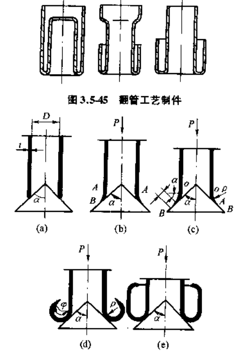


图 3.5-45　翻管工艺制件

图 3.5-46　翻管变形过程



翻管工艺除了如图3.5-46所示的锥形模以外，还有圆角模、槽模和拉伸翻管模。翻管既可以从内向外翻，也可以从外向内翻。外翻会导致管壁变薄，内翻则会使管壁变厚。翻管工艺的适用材料有铝合金、铜、低碳钢、奥氏体不锈钢以及钛合金等。目前从 $\phi10$ mm×1 mm 到 $\phi250$ mm×5 mm 的管坯，已能成功地翻成双层管。翻管制件在吸能元件及管接头等方面得到很好的应用。

2 曲面零件成形

曲面零件成形是轴对称零件成形的一种，一般采用拉深成形的方法，但其变形性质却与圆筒形零件的拉深有很大的区别。圆筒形零件拉深成形时，只有法兰部分为变形区，变形区的变形性质为一拉一压的应力状态，即径向为拉应力，切向为压应力。而曲面零件成形时，不仅法兰部位产生塑性变形，凹模内部的毛坯也产生塑性变形，法兰部位的毛坯产生的变形与圆筒零件法兰部位的变形性质相同，凹模内部毛坯即有一拉一压的拉深变形，也有两向拉应力作用下的胀形变形。

如图3.5-47所示，在成形开始时，毛坯中心部位首先产生塑性变形，其受力为两向拉应力，$\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$，所产生的塑性变形为两向伸长应变，$\varepsilon_r>0$，$\varepsilon_\theta>0$；而在法兰变形区内，毛坯受到一向拉应力和一向压应力的作用，$\sigma_r>0$，$\sigma_\theta<0$，所产生的塑性变形为一向伸长应变，一向压缩应变，即 $\varepsilon_r>0$，$\varepsilon_\theta<0$。因此，从法兰部位到毛坯中心部位，切向应变从压缩应变连续变化到伸长应变，中间必有一个圆周上的切向应变为零，$\varepsilon_\theta=0$，称该圆周为应变分界圆；同理，切向应力从压应力连续变化到拉应力，中间必有一个圆周上的切应力为零，$\sigma_\theta=0$，称该圆周为应力分界圆。在应力分界圆内为两向拉应力下的胀形变形，在应力分界圆外为一拉一压应力下的拉深变形，因此，曲面零件成形时毛坯的变形为拉深和胀形的复合变形。

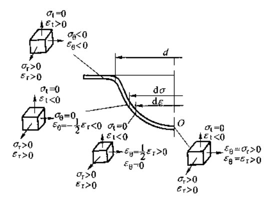


图3.5-47 曲面零件成形时的毛坯变形分析

由于曲面零件的变形特点，起皱和破裂是成形过程中容易产生的质量问题。与圆筒形零件不同，曲面零件成形时不仅会在法兰面上产生起皱，而且在靠近凹模口的内部毛坯也可能在压应力作用下产生起皱；同时，在毛坯中央区域还会产生塑性破裂。

2.1 半球形件成形

图3.5-48为几种典型的球面零件，根据零件的球面大小及是否带有法兰或直壁，其拉深工艺也不相同。

(1) 半球面件拉深

半球面件（图3.5-48a）拉深系数为：

$$m=\frac{d}{D_0}=\frac{d}{\sqrt{2}d}=0.707 \tag{3.5-1}$$

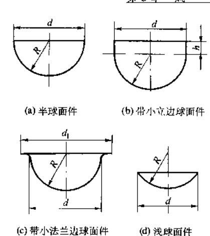
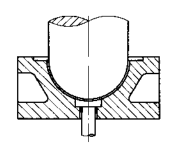


图3.5-48 各类球面零件

由于拉深系数 m 是常数，因而，半球面零件的成形难易取决于毛坯的相对厚度 t/D_0。

1) $t/D_0>3\%$时，用如图3.5-49所示模具拉深，不用压边装置，但在行程终了时应进行整形，以提高零件的表面质量。因此，最好使用摩擦压力机或液压机。


图3.5-49 带球形底面的凹模

2) $t/D_0=0.5\%\sim3\%$时，可采用如图3.5-50所示模具结构。图3.5-50a为用带拉深筋进行拉深；图3.5-50b为用反锥形压料面模具进行拉深；图3.5-50c为反拉深成形。

采用平面压边时，需加压边力防止内部起皱，压边力大小为：

$$Q=\pi/4\ (D_0^2-d^2)\ q_0 \tag{3.5-2}$$

式中，D_0 为毛坯直径，mm；d 为半球面件直径，mm；q_0 为单位压边力，MPa，可查表3.5-18。

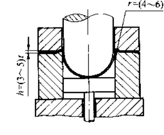
3) $t/D_0<0.5\%$时，极易形成内皱，可采用如图3.5-51所示方法成形，防止起皱。采用阶梯拉深（图3.5-51e）时，直径增加量由表3.5-19选取，并采用较大的凹模圆角半径，以减少冲击线。

(2) 浅球面件拉深

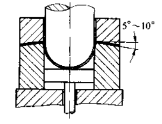
高度小于球面半径的球面零件称为浅球面件（图3.5-48d）。其拉深工艺可分为两类：$D_0\leqslant9\sqrt{Rt}$时，可用带底凹模一次成形（参见图3.5-49）。

$D_0>9\sqrt{Rt}$时，要采用带压边装置的模具一次拉深成形。但应加一定宽度的法兰边，成形后再行修边。

图3.5-52给出了不用压边成形的极限（适用于 $t=0.75\sim2$ mm的材料）。上极限值用于球面质量要求不高的浅球面件；下极限值用于球面质量要求较高的浅球面件。



(a) 带拉深肋的模具拉深



(b) 反锥形压料面拉深成形

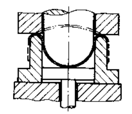
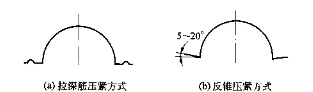

(c) 反拉深成形

图 3.5-50 半球形件拉深成形方法

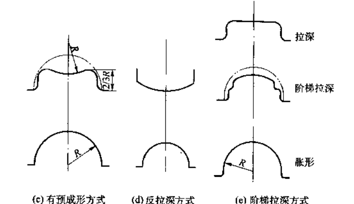
表 3.5-18 防止内部起皱必要的初始单位压边力 q_0 值 MPa

D_0/d	$t/D_0 \times 100$	
	0.3~0.6	0.6~1.3
1.5	5.0~6.0	3.0~3.5
1.6	3.5~4.5	1.7~2.2
1.7	1.5~3.0	1.0~1.5
1.8	0.7~1.5	1.0~1.2

注：表中数值适用于压边圈下无润滑、厚度为 0.5~2 mm 冷轧低碳钢坯料。如果采用润滑，表中数值应该增大 50%~100%。



(a) 拉深筋压紧方式　(b) 反锥压紧方式



(c) 有预成形方式　(d) 反拉深方式　(e) 阶梯拉深方式

图 3.5-51 各类薄壁球面件拉深方法

表 3.5-19 阶梯拉深时直径加大量 mm

曲面侧壁值	≤50	50~100	100~150	150~200	200~
直径增大量 Δd	3~6.5	5~8	7~10	9~13	10~15

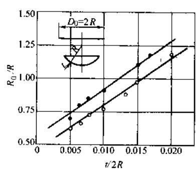


图 3.5-52 不用压边成形的极限
—·—·—勉强成形的上极限值
—∘—∘—成形良好的下极限值

2.2 抛物形件成形

图 3.5-53 所示的抛物线形状件拉深成形难度主要取决于零件的相对高度 h/D_0、毛坯相对厚度 t/D_0 及顶部圆角半径 r。

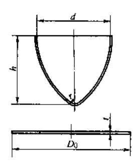


图 3.5-53 抛物线形状件

(1) 浅抛物线形状件

对 $h/D_0 \leq 0.5 \sim 0.6$ 的浅抛物线形零件，可根据毛坯相对厚度 t/D_0 的不同，选用半球面形件相应的拉深方法。

(2) 深抛物线形状件

对 $h/D_0 > 0.6$ 的深抛物线形零件，必须多次拉深成形。因此，若每道工序的形状、凸模圆角半径 r_p、凹模圆角半径 r_d 设计有误，容易产生破裂、内皱、冲击线等缺陷。其成形方法可分为3类。

1) 相似法。如图3.5-54所示，通过几次拉深，逐渐逼近制件形状。

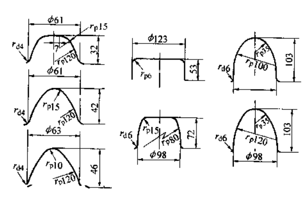


图3.5-54 抛物线形状件相似拉深法

2) 阶梯拉深法。如图3.5-55a、b所示，通过几次拉深接近制件大直径后，再拉深到制件的大直径。之后大直径不变，再以近似制件形状进行阶梯拉深。最后胀形成形为所需零件。

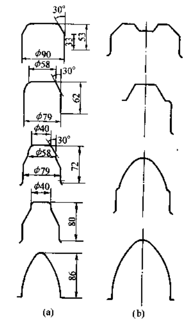


图3.5-55 抛物线形状件阶梯拉深法

3) 反拉深法。如图3.5-56所示的方法，先经过几次拉深接近制件大直径后，进行反拉深得到制件的近似形状，最后用胀形方法整形为所需零件。

2.3 锥形件成形

(1) 锥形件拉深变形特点

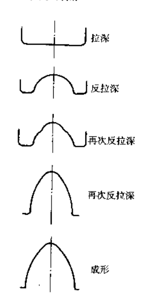


图3.5-56 抛物线形状件反拉深法

图3.5-57所示圆锥形件拉深，变形区不仅在压边圈下的法兰部分，而且传递作用力的悬空部分也是变形区。其变形特点与曲面零件拉深时毛坯变形特点相同。在悬空部分存在一应力分界圆（$\sigma_\theta = 0$）（图3.5-58），将悬空侧壁分为两部分：分界圆内侧的胀形变形区（$\sigma_r > 0$，$\sigma_\theta > 0$），锥顶部分的承载能力最弱，易出现破裂；分界圆外侧为拉深变形区（$\sigma_r > 0$，$\sigma_\theta < 0$），该部位抗压缩失稳能力差，易出现起皱现象，在凹模内部的侧壁上的起皱称为内皱或体皱。

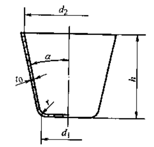


图3.5-57 锥形件各部分尺寸

(2) 成形极限

锥形件的成形极限主要与其几何参数 h/D_d、D_p/D_d、t_0/D_d 等有关。

1) 最大成形深度 $[h_{max}]$。把不发生破裂及起皱的最大成形深度 $[h_{max}]$ 作为衡量或评价成形难易的重要工艺参数，称锥形件的成形极限（图3.5-59）。

① 用经验公式确定：

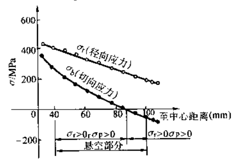
当 $D_d < 300$ mm 时

$$[h_{max}] = (0.057R - 0.003\,5)\ D_d + 0.171D_p + 0.58r_p + 36.6t_0 - 12.1 \tag{3.5-3}$$

当 $D_d \geq 300$ mm 时

$$[h_{max}] = A_d D_d - 0.129D_p + 0.354r_d + 0.491r_p + 3.1 + H_d \tag{3.5-4}$$

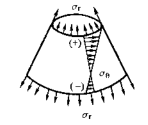
式中，R 为板厚方向性系数；$D_d D_p$ 为分别为凸模和凹模的直径，mm；$r_d r_p$ 为分别为凸模和凹模的圆角半径，mm；t_0 为毛坯厚度，mm；$A_d H_d$ 为分别为系数，其值见表 3.5-20。



凸模直径 D_p=80mm　凹模直径 D_d=20mm

成形深度 h=36.8mm

(a) 应力分布



(b) 应力模型

图 3.5-58　锥形件侧壁应力分布

因为凹模直径在 ϕ300 左右时起皱极限及破裂极限曲线的斜率变化较大，故经验公式在此值前后也不同。

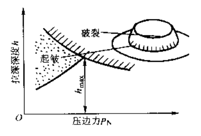


图 3.5-59　锥形件拉深的极限成形深度

② 锥形件的极限成形深度也可利用图 3.5-60 的计算图确定。

2) 最大相对毛坯直径 $[D_0/d_1]_{max}$。由试验结果得到锥形件一次拉深的最大相对毛坯直径 $[D_0/d_1]_{max}$ 可用以下经验公式计算：

$$\ln[D_0/d_1]_{max} = 0.4044 + 2.848(t_0/d_1) + 2.236(t_0/d_1)^2\cos\alpha/42.79(t_0/d_1)\cos\alpha + 0.5349\cos\alpha - 2.142(t_0/d_1) \quad (3.5\text{-}5)$$

式中，t_0、D_0 为分别为初始毛坯的厚度和直径，mm；α 为锥形件的半锥角，(°)；d_1 为锥形件小端直径，mm。

式 (3.5-5) 适用于 $30° \leqslant \alpha \leqslant 60°$ 范围内成形。

3) 极限拉深系数 $[m_{zd}]$。锥形件的极限拉深系数 $[m_{zd}]$ 用式 (3.5-6) 表示，可用式 (3.5-7) 确定。

$$[m_{zd}] = d_2/D_0 \quad (3.5\text{-}6)$$

$$[m_{zd}] = 0.9^{1-K}[m_1]^K \quad (3.5\text{-}7)$$

表 3.5-20　系数 A_d、H_d 的值

A_d 的值			H_d 的值		
润滑油＼钢种	沸腾钢	铝镇静钢	D_d/mm＼钢种	沸腾钢	铝镇静钢
全损耗系统用油	0.162	0.163	400	25	29
工作油 660#	0.177	0.183	600	35	39

式中　d_2 为锥形件大端直径，mm；D_0 为毛坯直径，mm；$K=d_1/d_2$ 为相对锥顶直径；d_1 为锥形件小端直径，mm；$[m_1]$ 为圆筒形件的极限拉深系数。

因此，根据 $[m_1]$ 可很容易求得 $[m_{zd}]$。也可由表 3.5-21 查得 $[m_{zd}]$，或根据相对锥顶直径 K 和毛坯相对厚度 t/D_0 由图 3.5-61 查得 $[m_{zd}]$，依此判断可否一次成形。

4) 最大相对高度 h/d_2。根据相对锥顶直径 K 和极限拉深系数 $[m_{zd}]$，由下式求得一次拉深的最大相对高度 $[h/d_2]$：

$$[h/d_2] = 1/2(1+K)[(1/[m_{zd}]^2 - 1)(1/[m_{zd}]^2 + 1 - 2K^2)]^{1/2} \quad (3.5\text{-}8)$$

一次拉深的最大相对高度 $[h/d_2]$ 可由图 3.5-62 和表 3.5-22 直接查得。

(3) 锥形件的成形方法

1) 锥形件拉深用模具形式。锥形件成形时，易发生悬空部位的起皱，通常用带压边装置的模具。常用的几种模具结构形式如图 3.5-63 所示。其中锥-锥型模具（图 3.5-63a）锥面成形效果最好。柱—锥型模具（图 3.5-63b）次之。成形效果较差的是锥—筒型（图 3.5-63c）和柱—筒型（图 3.5-63d）。模具结构形式影响锥形件表面成形效果，但与工艺参数的确定无太大关系。

2) 成形方法

① 浅锥形件（$h/d_2 < 0.25$）。当毛坯相对厚度充分大时，可不用压边装置进行拉深。

这类锥形件（半锥角 $\alpha = 50° \sim 80°$）拉深成形过程中毛坯的变形程度小，拉深后零件的弹复（回弹）严重，容易产生内皱。为保证制件形状、尺寸精度，无论制件有无法兰均需要按有法兰制件拉深，即用带压边装置的模具进行一次拉深成形。最后通过修边，修掉法兰。拉深模具结构与球面零件拉深模具结构类似（图 3.5-50），可选用带拉深筋结构、带拉深槛结构或带反锥度压料面模具结构。

对宽法兰的浅锥形件拉深时，主要靠胀形变形成形，压边圈要把整个法兰压紧，成形后修边，如图 3.5-64 所示。

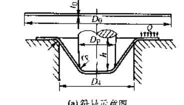
② 中锥形件（$h/d_2 = 0.3 \sim 0.7$）。这类锥形件一般半锥角 $\alpha = 15° \sim 45°$。根据毛坯相对厚度大致可分成以下情况：

当 $t/d > 2.5\%$ 时，可不用压边装置一次拉深成形，但在行程终了施压精整，如图 3.5-65 所示。

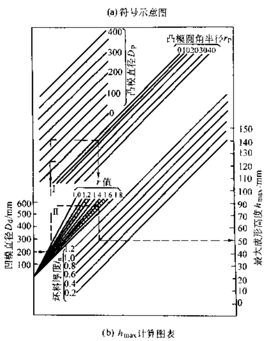
当 $t/d = 1.5\% \sim 2\%$ 时，采用带压边的一次成形，成形后修边。

当 $t/d < 1.5\%$ 时，可选用如图 3.5-66 中所示的某种方法。

③ 深锥形件（$h/d_2 > 0.8$，$\alpha = 10° \sim 30°$）。这类锥形件一般进行多次拉深，其成形方法有如下几种。



(a) 符号示意图



(b) h_{max}计算图表

图 3.5-60 锥形件拉深时最大成形深度计算图

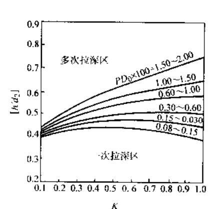


图 3.5-61 锥形件成形极限曲线

图 3.5-62 锥形件的极限拉深高度 $[h/d_2]$ 曲线

表 3.5-21 锥形件极限拉深系数 $[m_{rd}]$

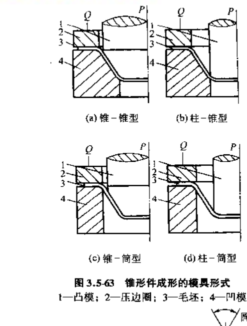
K \ $t/D_0\times100$	0.08~0.15	0.15~0.30	0.30~0.60	0.60~1.00	1.00~1.50	1.50~2.00
0.1	0.869	0.864	0.861	0.857	0.854	0.849
0.2	0.838	0.830	0.824	0.816	0.810	0.800
0.3	0.809	0.797	0.789	0.776	0.768	0.755
0.4	0.780	0.765	0.755	0.739	0.728	0.712
0.5	0.753	0.735	0.723	0.704	0.691	0.671
0.6	0.727	0.706	0.692	0.670	0.655	0.633
0.7	0.701	0.678	0.662	0.638	0.621	0.597
0.8	0.677	0.651	0.633	0.607	0.589	0.562
0.9	0.653	0.625	0.606	0.578	0.559	0.530
1.0	0.630	0.600	0.580	0.550	0.530	0.500

注：本表适用于08、10S、15S钢与软黄铜H62、H68。

表 3.5-22 锥形件一次拉深的最大相对高度 $[h/d_2]$

K \ $t/D_0\times100$	0.08~0.15	0.15~0.30	0.30~0.60	0.60~1.00	1.00~1.50	1.50~2.00
0.1	0.393	0.402	0.409	0.418	0.425	0.435
0.2	0.415	0.431	0.442	0.460	0.472	0.492
0.3	0.428	0.451	0.467	0.491	0.509	0.537
0.4	0.436	0.464	0.484	0.516	0.538	0.575
0.5	0.438	0.472	0.496	0.534	0.562	0.608
0.6	0.436	0.474	0.503	0.549	0.582	0.638
0.7	0.428	0.473	0.506	0.560	0.599	0.666
0.8	0.417	0.468	0.505	0.568	0.614	0.693
0.9	0.401	0.458	0.501	0.573	0.628	0.721
1.0	0.380	0.445	0.494	0.577	0.640	0.750

注：本表适用于08、10S、15S钢与软黄铜H62、H68。



(a) 锥－锥型　(b) 柱－锥型

(c) 锥－筒型　(d) 柱－筒型

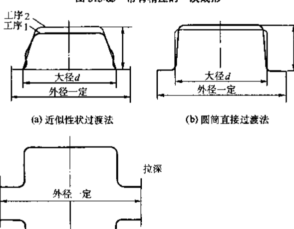
图 3.5-63　锥形件成形的模具形式

1—凸模；2—压边圈；3—毛坯；4—凹模

(a) $h/d<0.2$, $2\alpha=90°\sim135°$　(b) $h/d<0.3$, $2\alpha<60°$

图 3.5-64　带宽法兰锥形件的拉深

图 3.5-65　带有精压的一次成形

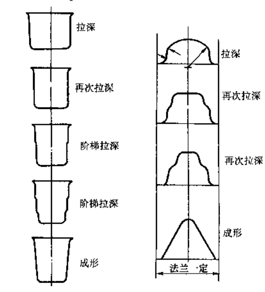


(a) 近似性状过渡法　(b) 圆筒直接过渡法

(c) 反拉深法

图 3.5-66　由过渡形状成形锥形件

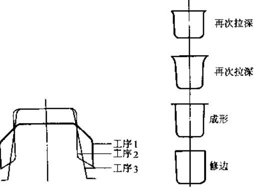
a）阶梯成形法。先拉深成接近零件形状的阶梯圆筒，最后整形到零件形状，如图 3.5-67 所示。为减少冲击线，拉深时尽量加大 r_d。



(a) 阶梯过渡成形　(b) 阶梯过渡尖锥成形

图 3.5-67　阶梯成形法

b）圆筒过渡成形法。其成形方法如图 3.5-68 所示。



(a) 成形模型图　(b) 锥形件成形示意图

图 3.5-68　圆筒过渡成形法

c）反拉深法。多次反拉深后成形制件大直径，最后由反拉深成形所需制件。如图 3.5-69 所示。

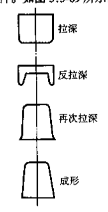


图 3.5-69　反拉深法成形



④ 带宽法兰锥形件拉深。这类零件多采用宽法兰成形和阶梯拉深组合方法成形，如图3.5-70所示。

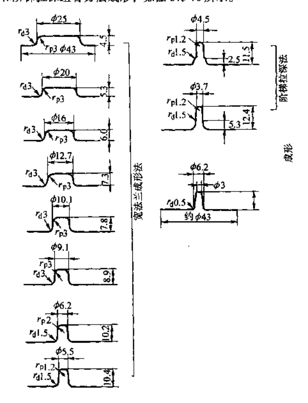


图3.5-70 宽法兰成形和阶梯拉深组合成形法

3 汽车覆盖件的冲压成形

3.1 汽车覆盖件材料

汽车覆盖件所用材料一般是冷轧钢板。我国国家标准按冲压级别将冷轧钢板分为：最复杂拉深级（用ZF表示，下同）、很复杂拉深级（HF）、复杂拉深级（F）、最深拉深级（Z）、深拉深级（S）和普通拉深级（P）；按强度级别可将冷轧钢板分为：普通强度、高强度和超高强度钢板。高强度钢板和超高强度钢板按其强化机理又可分为：固溶强化、析出强化、组织强化、复合组织强化、热处理硬化型强化、相变强化、冷作强化及时效强化等。另外还有涂层钢板、复合材料板（如钢板涂覆塑料的复合板、不同金属叠合在一起的冷轧叠合板、多层复合板）等。

冷轧铝镇静钢板已成为目前汽车覆盖件用量最大的冷轧钢板之一。它具有较高的强度和较好的塑性变形能力，且由于钢中的铝对氮有固定作用，故冲压成形后零件表面不产生滑移线，是一种非时效钢板。其化学成分和力学性能见表3.5-23。

各种冷轧钢镇静钢板的艾利克森值如表3.5-24。

随着汽车工业的发展，许多具有高性能的覆盖件用板材不断得到研究和开发，并已在生产中得到广泛应用，从而也促进了汽车车身水平和冲压技术水平的提高。

（1）加磷铝镇静钢板

加磷铝镇静钢板在汽车车身上得到大量应用，是因为它具有较多的优点。

1）强度高 加磷铝镇静钢板的抗拉强度比所代用的08Al冷轧钢板约提高15%～25%，可节约钢板10%～17%。

表3.5-23 冷轧铝镇静钢板的化学成分和性能

钢号	冲压级别	厚度/mm	化学成分（质量分数）/%						屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	延伸率 δ_5/%
			C	Si	Mn	P	S	Al			
08Al	ZF	全部	≤0.08	≤0.03	≤0.40	≤0.020	≤0.030	0.02～0.07	≤195	255～325	≥44
	HF								≤205	255～335	≥42
	F	>1.2							≤215	255～345	≥39
		1.2							≤215	255～345	≥42
		<1.2							≤235	255～345	≥42
08Al	Z	全部	0.05～0.12	≤0.03	0.25～0.65	≤0.035	≤0.035	0.015～0.065	—	275～390	≥32
	S									275～410	≥30
	P									275～410	≥28
St12		全部	≤0.10		≤0.50	≤0.035	≤0.035	—	≤280	270～410	≥28
St13		全部	≤0.08		≤0.45	≤0.030	≤0.035		≤240	270～370	≥34
St14		全部	≤0.08		≤0.40	≤0.020	≤0.030		≤210	270～350	≥38
St15		全部	≤0.06	0.03	≤0.35	≤0.020	≤0.025	0.025～0.070	≤195	250～330	≥40

2）较好的塑性。一般来说，钢板在强度指标增加的同时要损失塑性指标，但这种钢板的塑性的下降并不太大，这对拉胀复合成形是非常重要的。

3）板厚方向抗变形能力强。加磷铝镇静钢板因为含磷而具有较大的厚向异性系数 r 值，表明其在板平面内的变形比板厚方向的变形要容易。在汽车覆盖件冲压成形中，这种性能可以减缓厚度变薄程度，提高成形极限。

4）烘烤硬化性能。这种钢板在冲压成形时的屈服强度较低，有利于冲压成形，但在进行表面涂漆后进行200℃左右的烘烤时，其屈服强度得到一定程度的提高，从而增加了覆盖件的强度。另外，这种钢板还具有耐腐蚀等优秀特点。

表3.5-25是含磷冷轧钢板的成分和性能。

含磷高强度冷轧钢板的冲压成形性能见表3.5-26。



表 3.5-24　08Al 冷轧钢板的艾利克森值　mm

厚度	ZF	HF	F	Z	S	P
0.5	9.5	9.3	9.1	9.0	8.4	8.0
0.6	9.8	9.6	9.4	9.4	8.9	8.5
0.7	10.3	10.1	9.9	9.7	9.2	8.9
0.8	10.6	10.5	10.3	10.0	9.5	9.3
0.9	10.8	10.7	10.5	10.3	9.9	9.6
1.0	11.2	10.8	10.7	10.5	10.1	9.9
1.1	11.3	11.0	10.9	10.8	10.4	10.2
1.2	11.5	11.2	11.1	11.0	10.6	10.4
1.3	11.7	11.3	11.3	11.2	10.8	10.6
1.4	11.8	11.4	11.4	11.3	11.0	10.8
1.5	12.0	11.6	11.5	11.5	11.2	11.0
1.6	—	11.8	11.7	11.6	11.4	11.2
1.7	—	12.0	11.9	11.8	11.6	11.4
1.8	—	12.1	12.0	11.9	11.7	11.5
1.9	—	12.2	12.1	12.0	11.8	11.7
2.0	—	12.3	12.2	12.1	11.9	11.8

(2) 加磷铝镇静烘烤硬化钢板

多数大型汽车覆盖件中间部位变形较小，汽车行驶中经常受沙石或重物碰击而产生凹陷。一般认为，钢板的屈服强度越高，抗凹陷的能力越强，但提高屈服强度会降低深冲性能。为实现汽车轻量化而大量应用高强度薄钢板，使这一矛盾更突出。因此，要求钢板在冲压成形前具有较低的屈服强度，经冲压成形中拉伸变形后，进行高温时效处理，钢板的屈服强度可以得到一定程度的提高，这种钢板称为烘烤硬化钢板，简称 BH 钢板。

烘烤硬化钢板的硬化机理为：冷轧退火钢板中的碳、氮原子以间隙固溶状态存在，钢板经预变形，导致基体位错密度增加，碳、氮原子向位错扩散的距离缩短。高温时效处理使碳、氮原子扩散的热激活能提高，并在位错处聚集，钉扎位错。若使钢板继续变形，需要更高的屈服应力。

常规拉伸试样在预变形 7.5% 的屈服应力与随后 100℃ 加热 30 min 后的屈服应力的差值称为时效指数，用 *AI* 表示。

常温时效性（*AI*）和烘烤硬化性（*BH*）同属应变时效，*AI* 值与 *BH* 值存在着必然的联系。如图 3.5-71 所示，*AI* 与 *BH* 存在线性关系，*BH* 值越大，*AI* 值越高。

烘烤硬化钢板的实际成分和性能如表 3.5-27。不同温度的 BH 值如表 3.5-28 所示。

(3) 超深冲 IF 冷轧钢板

在超低碳钢（C≤0.005%，N≤0.004%）中，加入足够量的元素钛和铌，使钢中的碳、氮原子完全被固定成碳、氮

表 3.5-25　含磷冷轧钢板的成分和性能

钢号	化学成分/%						屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ_5/%	*r* 值	*n* 值
	C	Si	Mn	P	S	Al					
06AlP	≤0.06	≤0.064	≤0.35	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19
08AlP	≤0.08	≤0.06	≤0.70	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19
10AlP	≤0.14	≤0.03	≤1.00	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19
WP340	≤0.06	≤0.03	≤0.35	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19
WP370	≤0.08	≤0.03	≤0.40	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19
WP390	≤0.10	≤0.03	≤0.45	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19
BP340	≤0.06	≤0.03	≤0.35	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19
BP400	≤0.08	≤0.03	≤0.35	0.05 ~0.08	≤0.06	0.05 ~0.08	≥215	340 ~420	≥35	≥1.4	≥0.19

表 3.5-26　含磷高强度冷轧钢板的冲压性能

钢号	极限拉深比 LDR 值	锥杯值 CCV/mm	扩孔率/%	拉深系数 *m*	*BH* 值 /MPa	*AI* 值 /MPa
06AlP	2.19	36.5	175.00	0.68	17.0	9.3
08AlP	2.04	38.2	153.00	0.62	11.0	4.9
WP340	2.06 ~ 2.16	38.2 ~ 38.9	135 ~ 155	0.79	—	—
WP390	2.01 ~ 2.04	39.2 ~ 39.3	110 ~ 120	0.80	—	—
BP340	2.05 ~ 2.16	37.6	136 ~ 145	0.68	12.0	4.6
BP400	1.96 ~ 2.03	39.6	121 ~ 130	0.64	15.3	10.8

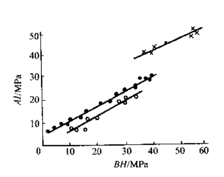


图 3.5-71　*BH* 值与 *AI* 值的关系



表 3.5-27 烘烤硬化钢板的实际成分和性能

钢号	化学成分/%						屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	延长率 δ_5/%	BH 值 /MPa	r 值	n 值
	C	Si	Mn	P	S	Al						
BP340A①	0.026	0.022	0.23	0.103	0.009	0.041	207.5	355.0	41	39.5	1.64	0.239
BP340A②	0.023	0.019	0.23	0.098	0.008	0.050	245.5	375.5	39	53.7	1.59	0.232
WHB340	0.038	0.020	0.27	0.064	0.019	0.083	218.5	353.5	42	39.5	1.61	0.229
A220BH	0.040	0.030	0.28	0.048	0.013	0.044	212.0	360.0	40	31.1	1.29	0.238

① 罩式退火。
② 连续退火。

表 3.5-28 不同温度的 BH 值 MPa

钢号	时效温度/℃								
	70	100	135	170	200	230	260	290	350
BP340A①	22.39	23.83	31.88	39.45	48.73	49.46	58.10	57.54	55.80
BP340A②	37.10	40.40	45.03	49.51	49.79	56.02	63.66	63.61	56.38
WHB340	22.88	22.66	29.62	32.44	33.31	39.09	62.11	60.17	63.10
A220BH	—	—	—	31.05	32.40	39.30	54.05	56.10	51.13

① 罩式退火。
② 连续退火。

化合物 Ti（C、N），Nb（C、N），钢中无间隙固溶原子存在，这种钢称为“无间隙原子钢”，即 Interstitial Free Steel，简称“IF 钢”。目前，全世界 IF 钢板的产量约在 4 000 万吨左右，仅日本的年产量已近 1 000 万吨，已成为汽车，特别是轿车覆盖件用冷轧钢板的一种主要钢种。IF 钢板已形成普通 IF 钢板、电镀锌 IF 钢板、热镀锌 IF 钢板、镀铝 IF 钢板、不锈 IF 钢板、高强度 IF 钢板等系列。在 IF 钢板中加入适量的磷实现固溶强化，并具有好的烘烤硬化性能，这种钢称为“超低碳高强度烘烤硬化钢板”，即“Extra Low-Carbon and High Strength Steel Sheet with Back Hardenability”。

在 IF 钢板中，根据添加的微合金元素的不同，可将 IF 钢板分为 Ti-IF 钢板、Nb-IF 钢板和（Ti + Nb）-IF 钢板三大类。当钢中加入足够的钛元素时，冷轧钢板虽能获得高的 r 值，但伸长率有所下降；钢中加入铌元素，冷轧钢板 45°方向的 r 值得到了提高；若铌的含量高时，伸长率亦有所下降；钢中加入 Ti-Nb 复合元素，可获得 r 值高、又不会降低其伸长率的冷轧钢板。

IF 冷轧钢板具有许多优秀特点。①杂质元素（Si、Mn、P 和 S）含量少；②屈服强度低（$\sigma_s \leqslant 180\ N/mm^2$）和低屈强比（$\sigma_s/\sigma_b \leqslant 0.55$）；③塑性伸长率大（$\sigma_{10} \geqslant 45\%$）；④硬化指数 n 值和厚向异性系数 r 值高，使其具有很优异的深冲性能；⑤无时效性（时效指数 $AI \approx 0$）。

表 3.5-29 为 St12，St13，St14 冷轧钢板的性能。

表 3.5-29 St12、St13、St14 钢板拉伸性能范围

牌号	拉伸性能			硬度		
	屈服强度 σ_s/MPa	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ（80 mm 标距）/%	HRB	HRF	HR30T
St12	≤280	270 ~ 410	≥28	≤65	≤94	≤60
St13	≤240	270 ~ 370	≥34	≤55	≤88	≤53
St14	≤210	270 ~ 350	≥38	≤50	≤86	≤50

（4）镀锌钢板

汽车在运行过程中，经受着含有各种酸或碱的空气、湿气、水、油等物质的腐蚀。汽车的使用寿命，特别是轿车的使用寿命在较大程度上取决于车身的腐蚀速度。为提高覆盖件的耐腐蚀性能，镀锌钢板在轿车上得到越来越多的应用。我国生产的奥迪、富康轿车上所用的镀锌钢板约占钢板总量的 74%以上。

汽车用镀锌钢板有电镀锌钢板（含一般电镀锌钢板和合金电镀锌钢板）和热镀锌钢板（含一般热镀锌钢板和合金热镀锌钢板）两大类。电镀锌钢板的拉深性能更优良，多用于汽车覆盖件的生产。其化学成分和力学性能如表 3.5-30 和表 3.5-31。

表 3.5-30 电镀锌钢板的化学成分（质量分数） %

钢号	脱氧方式	C	Si	Mn	P	S	标准
SECC	铝镇静	≤0.12	≤0.05	≤0.50	≤0.035	≤0.035	Q/BQB430 ~ 94
SECD		≤0.10	≤0.03	≤0.45	≤0.030	≤0.035	（宝钢标准）
SECE		≤0.08	≤0.03	≤0.40	≤0.025	≤0.030	

除上述钢板之外，还有很多具有特殊功能或性能的材料在汽车覆盖件上得到应用。如有减振、降噪、减重等功能的复合型板材；具有良好的成形性、焊接性和抗腐蚀能力的锌铬镀层板；在钢板基体上涂覆塑料薄膜、树脂等的涂层板，使材料具有很好的成形性能，拉深时的极限拉深比提高 20%以上。

表 3.5-31 电镀锌钢板的力学性能

钢种	抗拉强度 σ_b/MPa	伸长率 δ/%，b_0 = 25 mm，l_0 = 50 mm					
		<0.4	0.40～<0.6	0.6～<1.0	1.0～<1.6	1.6～<2.5	≥2.5
SECC	≥270	≥32	≥34	≥36	≥37	≥38	≥39
SECD		≥34	≥36	≥38	≥39	≥40	≥41
SECE		≥36	≥38	≥40	≥41	≥42	≥43

3.2 汽车覆盖件的成形特点及分类

按深度大小可把汽车覆盖件分为深拉深件、中等拉深件、浅拉深件等三类。这种分类能在一定程度上反映汽车覆盖件冲压成形时产生破裂的可能性大小。但按零件深度判断成形难易的分类有很大的局限性，不能很好地反映起皱、面畸变、表面质量等要求，也不能完全反映汽车覆盖件冲压成形难度的大小。

汽车覆盖件的总体结构特点决定了其变形特点，可以对其进行变形分析，制定冲压工艺或分析出现的质量问题的产生原因。为此，必须首先分析组成汽车覆盖件的结构特征，然后在此基础上分析其变形特点。否则，对整个覆盖件冲压成形进行变形特点分析是很困难的，甚至会感到无从下手。

在板材冲压成形的理论和技术中，对直壁轴对称形状零件、直壁椭圆形状零件、曲面轴对称形状零件、圆锥体形状零件及盒形零件等在冲压成形中的变形特点、主要冲压工艺参数的确定等已经基本可以定量化计算，冲压条件、模具、板材冲压性能等因素对这些零件冲压成形的影响规律也已基本上比较明确。因此，要以此为基础进行汽车覆盖件冲压变形特点分析。

分析判断汽车覆盖件的变形特点时，首先要对汽车覆盖件的结构进行“分解”。即：把一个汽车覆盖件的形状看成是由若干个“基本形状”（或其一部分）组成的。这些“基本形状”有：直壁轴对称形状（包括直壁椭圆形状）、曲面轴对称形状、圆锥体形状及盒形形状等。而每种“基本形状”又可以分解成是由法兰形状、轮廓形状、侧壁形状、底部形状等结构特征元素组成的。

通过对汽车覆盖件的结构进行分解，就可以先确定各“基本形状”和结构特征元素的主要变形特点，再把相邻的“基本形状”之间的相互影响考虑进去，就能够分析出汽车覆盖件的主要变形特点，判断出各部位的成形难点，预先制定防止对策。

表 3.5-32 列出了汽车覆盖件的结构特征分类情况，对任何一个汽车覆盖件都可以分解为表中所示的不同结构特征元素（或特征元素的部分形状）的组合。

表 3.5-32 汽车覆盖件的结构特征元素

部位	编号	部位形状	图例	主要受力情况
法兰形状	A	平面法兰	平面法兰	法兰上的毛坯径向受拉应力作用，$\sigma_r>0$；外凸形轮廓及邻区的直边部分 $\sigma_\theta<0$，内凹形轮廓及邻区的直边部分的 $\sigma_\theta>0$
	B	上凸形法兰	上凸法兰	法兰上，$\sigma_r>0$，上凸部分在压边时就有 $\sigma_\theta>0$；成形时会有剪应力存在
	C	下凹形法兰	下凹法兰	法兰上，$\sigma_r>0$，下凹部分在压边时有 $\sigma_\theta>0$；成形时有 $\sigma_\theta<0$，并有剪应力存在
	D	多平面法兰	水平面法兰 斜平面法兰	斜平面法兰上 $\sigma_r>0$，较低处 $\sigma_\theta<0$，较高处 $\sigma_\theta>0$
	E	综合性法兰	下凹法兰 上凸法兰 平面法兰	不同的部位的应力状态不同，可分为上凸部分、下凹部分及平面部分等



续表 3.5-32

部位	编号	部位形状	图例	主要受力情况
轮廓形状	F	圆形轮廓		法兰部分为变形区，变形区内 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta<0$
	G	椭圆形轮廓		法兰部分为变形区，变形区内 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta<0$，但分布不均匀，曲率小的部位 σ_r 较小，曲率大的部位 σ_r 较大
	H	长圆形轮廓		直边部分以弯曲变形为主，$\sigma_r>0$，圆弧部分以拉深变形为主，$\sigma_r>0$，$\sigma_\theta<0$
	I	矩形轮廓		直边部分以弯曲变形为主，$\sigma_r>0$，圆弧部分以拉深变形为主，$\sigma_r>0$，$\sigma_\theta<0$
	J	局部内凹形轮廓	内凹轮廓	在内凹法兰部分，毛坯径向和切向均受拉应力 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$
侧壁形状	K	直壁	直壁	直壁为传力区，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$
	L	斜面侧壁	斜面侧壁	既是使变形区变形的传力区，本身也是变形区，靠近底部的受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$；靠近凹模口部的受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta<0$
	M	台阶侧壁	台阶侧壁	该部分形状成形时，成形初期为斜面侧壁，成形后期成形出台阶形状，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$

续表 3.5-32

部位	编号	部位形状	图例	主要受力情况
底部形状	N	平面底部	平面底部；法兰	底部胀形成形时，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$
	O	局部成形底部	局部成形底部；法兰	该部分产生胀形变形，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$
	P	外凸形曲面底部	R	该部分在拉深成形的初期就产生变形，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$
	Q	内凹形曲面底部	R	该部分在拉深成形的后期产生变形，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$
	R	台阶形底部	台阶底部	深度深的部分在拉深成形的初期就产生变形，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$；深度浅的部分在拉深成形的后期产生变形，受力状态为 $\sigma_r>0$，$\sigma_\theta>0$

3.3 覆盖件冲压成形的变形特点

汽车覆盖件的冲压成形具有与简单形状零件许多不同的特点，其变形极为复杂。较好地把握其成形特点，对其变形规律进行尽量细致的定性分析，可以为进行汽车覆盖件的冲压件设计、冲压工艺设计和模具设计奠定良好的基础。同时，随着计算机模拟复杂零件成形过程研究的不断深入，有可能定量地给出变形规律以及各种冲压成形参数。

汽车覆盖件冲压成形中，决定毛坯变形性质及冲压成形难度大小的最主要因素是其结构特点。只有根据汽车覆盖件的结构特点，分析清楚冲压成形中毛坯的主要变形特点及可能出现的问题，才能在拉深件设计、工艺设计和模具设计中采取相应的措施。

表 3.5-32 中所示汽车覆盖件的结构特征元素的变形特点如下。

(1) 冲压件的法兰形状

1) 平面法兰。在冲压成形中，法兰上毛坯的流动速度、变形量、变形分布等随着内轮廓的变化面变化，外凸轮廓部分法兰毛坯的变形特点以拉深变形为主（即压缩类变形）；内凹轮廓部分法兰毛坯的变形特点以胀形变形为主（即伸长类变形）。

2) 上凸形法兰。有上凸部分法兰的零件在冲压成形时，冲模上的相应部位压料面也呈上凸形状，因而有可能导致某断而上压料面的线长大于冲压件相应断面的线长。这种情况下，冲压过程中该断面就会产生多余材料，在冲压件上形成折皱。同时，压料而上的材料在向凹模内流动时，流动速度不均匀，且流动方向不垂直于凹模口。该部分材料内会产生一定程度的切向拉应力。

3) 下凹形法兰。与上凸形法兰零件相比，冲压成形时压料面形状对凹模内部毛坯变形产生的效果在总体上是基本相同的。但在法兰上，下凹部分材料内会产生切向压应力。

4) 多平面法兰。若冲压件的法兰是由几个平面组成的，倾斜的平面法兰部分的毛坯比水平平面法兰部分的毛坯受到模具压料面的阻力要小，材料容易流入凹模，但不易产生塑性变形，对高平面法兰部分的材料有带动流动作用。材料内产生剪应力和剪应变。在两平面相交呈下凹形状的交界处，毛坯在变形过程中就会产生材料多余甚至堆积；而在两平面相交呈上凸形状的交界处，毛坯在变形过程中就会产生材料变薄。

5) 综合性法兰。是由多个平面、曲面组合而成的。这种



法兰上毛坯的流动与变形特点可参考以上几种类型进行分析。

(2) 冲压件的轮廓形状

1) 圆形轮廓。若法兰和底部均为平面形状，且侧壁为轴对称，那么在同一圆周上，变形是均匀分布的，法兰上毛坯产生拉深变形；若法兰形状为非平面，则变形随着法兰的变化面变化。

2) 椭圆形轮廓。法兰上毛坯的变形为拉深变形，但变形量和变形比沿轮廓形状相应变化。曲率越大的部分，毛坯的塑性变形量越大；反之，曲率越小的部分，毛坯的塑性变形越小。

3) 长圆形轮廓。其圆形部分以拉深变形为主，直边部分以弯曲变形为主，两部分交界区有剪切变形。

4) 矩形轮廓。冲压件在成形时，直边部分法兰上毛坯以弯曲变形为主，转角部分法兰上毛坯以拉深变形为主。直边部分与转角部分之间的流动速度有差别，故在两部分相交区域会产生剪切变形。

5) 局部内凹轮廓（如 T 形状轮廓，L 形状轮廓等）。成形过程中，局部内凹轮廓部分法兰上的变形为两向伸长变形，而法兰其他部位为拉深变形。

(3) 侧壁形状

1) 直壁。毛坯上的材料进人凹模后成为冲压件的侧壁，其主要作用是向变形区传递变形力，一般不产生塑性变形。

2) 斜面侧壁。冲压件的侧壁为斜面时，侧壁在冲压过程中是悬空的，即不贴模，直到成形结束时才贴模。这种零件成形时侧壁的不同部位变形特点不完全相同，侧壁部分在径向受拉应力作用，产生伸长变形。靠近中央部位毛坯切向受拉应力，产生伸长变形，该部位的成形属胀形成形；面靠近凹模口部分毛坯切向受压应力，产生压缩变形，该部位的成形属拉深或形。即这种侧壁的成形属拉深—胀形复合成形。

3) 台阶侧壁。冲压件成形时，侧壁部位先是被径向拉伸形或斜面侧壁，或形的最后阶段才成为冲压件形状。这一部位的变形一般为胀形，有利于提高零件表面质量。

(4) 底部形状

1) 平面底部。拉深成形时该部位一般不产生塑性变形，刚性较差，表面形状精度不易保证。若胀形成形，则产生双向伸长变形。

2) 局部成形部位。该部位一般产生胀形变形。

3) 外凸曲面底部。一般在成形一开始就产生一定程度的胀形变形。

4) 内凹曲面底部。一般在成形的最后阶段产生一定程度的胀形变形。

5) 台阶形状底部。在成形一开始就有极度不均匀的变形分布，在台阶变化部分的侧壁易有诱发切应力存在，产生剪切变形，甚至形成皱纹或材料堆积。

3.4 汽车覆盖件成形工艺

(1) 覆盖件冲压成形基本工序

汽车覆盖件的形状复杂、尺寸大，因此一般不可能在一道冲压工序中直接获得，有的需要十几道工序才能完成。覆盖件冲压的基本工序有：落料、拉深、整形（也称校形）、修边、翻边和冲孔等。根据需要和可能性可以将一些工序合并，如落料拉深、修边冲孔、修边翻边、翻边冲孔等，还有的需要分几道工序加工不同的部位。

落料工序主要是获得拉深工序所需的毛坯形状和尺寸。有的大型覆盖件的下料工序利用剪板机对板材进行剪角，面减少落料模的费用。

拉深工序是覆盖件冲压的关键工序，覆盖件的形状大部分是在拉深工序形成的。

整形工序的主要内容是将拉深工序中尚未成形出的覆盖件形状成形出来。整形工序的变形性质一般是胀形变形，常复合在修边或翻边工序中。

修边工序的主要内容是切除拉深件上的工艺补充部分。这些工艺补充部分只是拉深工序的需要，拉深完成后要切除掉。

翻边工序位于修边工序之后，其主要任务是进行覆盖件边缘的竖边成形。

冲孔工序是加工覆盖件上的安装孔、连接孔等各种孔洞。冲孔工序一般安排在拉深工序之后，有的要安排在翻边工序之后。若先冲孔，会造成在拉深或翻边时孔位变化和孔的尺寸形状发生变化，使后面的安装和连接错位，甚至不能安装和连接。

(2) 工艺设计前的准备工作

1) 需要阅读的资料。在进行工艺设计之前，必须查阅有关资料，以使明确产品的具体要求、现有的条件等，为设计合理而可行的冲压工艺做好必要的准备。这些资料主要有：

① 零件图或实物图，必要时可参考主模型或数字模型。

② 冲压件的公差。

③ 类似零件的成形性及作业性的有关资料、曾出现的各种质量问题及解决办法。

④ 关于产品所用钢板材料的有关资料，如材料的各项性能参数值，表面质量等。

⑤ 各种模具设计的标准和模具零件的规格。

⑥ 现有压力机的参数和附属装置、生产率等方面的资料。

⑦ 产量和要求的时间。

2) 零件图和拉深件图的分析。通过对零件图和拉深件图的研究，应该了解该零件所应具有的功能、所要求的单个零件的强度，表面质量以及相关零件之间所要求的相关精度。并明确下列事项：

① 零件轮廓、法兰、侧壁及底部是否有形状急剧变化的部分、负角面的部位等，以及其他成形困难的形状。

② 该零件和有关零件的焊接面、装配面、镶嵌面有什么要求。

③ 焊接、装配的基准面和孔在何处。

④ 孔的精度（直径、位置）、孔和孔的间距的要求，这些孔的位置在何处（平面部分、倾斜部分、侧壁部分）。

⑤ 各个凸缘精度允许达到什么程度（包括长度、凸缘面的位置、回弹）。

⑥ 零件冲压成形需要解决的重点问题有哪些。

⑦ 材料的利用率如何。

(3) 冲压工艺方案设计

不同的冲压工艺方案，就有不同的产品质量、生产效率和生产成本。因此，根据具体情况正确选择冲压工艺方案是非常重要的。

在选择工艺方案和制定工艺流程时，必须考虑以下因素：

1) 生产纲领。生产纲领大小是设计冲压工艺时采用多大的工装系数、设备安排、原材料和半成品件及成品件等物流工艺、生产操作自动化程度的主要依据。

① 单件生产（一般指年产量为：<100 辆份●）。车身覆盖件的生产以板金（手工）工艺为主，使用很少量的模具、胎具，以便减少投资，降低生产成本。当然，所生产的覆盖件的质量要比用模具生产的覆盖件的质量差一些。

● 对批量生产的定义有各种不同的分类，轿车和载重车的分类也不同。这里所用的数据是通常概念上的轿车生产产量。

② 小批量生产（一般指年产量为：1 000～5 000 辆份）。为降低模具费用，一般拉深成形使用模具，而落料、修边则在一些通用设备上进行，翻边使用胎具，覆盖件上的孔用钻孔的方法加工。拉深模一般采用低熔点合金模、锌基合金模等。

③ 中批量生产（一般指年产量为：5 000～10 000 辆份）。在保证覆盖件质量的前提下，对关键性的覆盖件和劳动量较大的覆盖件，采用冲压模具，而一般的覆盖件冲压工艺方案则可在主要工序采用部分模具，其他部分工序采用迂回工艺。

④ 大批量生产（一般指年产量为：10 000～100 000 辆份）。覆盖件冲压工艺方案的关键在于生产的流水性，因此每一道工序都需要使用冲模。模具结构相对复杂，一般采用人工送料和取件，少量采用机械手取件。

⑤ 大量流水生产（一般指年产量为：＞100 000 辆份）。采用冲压自动线进行生产。自动线上的模具结构相对简单些，便于安装各种送料、取件、翻转、排除废料和传送工件等装置。

2）零件的形状和尺寸，材料的厚度和性质，以及对零件的质量、精度和使用要求等。在设计冲压工艺时要考虑到优先保证产品要求的质量项，其他要求也应尽量保证，在工艺难度与产品要求相矛盾时，要与产品设计共同协商，在不影响产品主要功能的前提下，改变产品结构尺寸，以增加冲压生产的稳定性。

3）现有设备条件和生产技术水平。冲压工艺应根据现有的设备条件和生产技术水平来安排，设备水平较低时，应少安排复合工艺，多采用简单模具，单工序生产，以保证产品质量。当通过计算预测，有新增设备效益时，应建议新增设备，提高生产技术水平和产品质量。

4）模具设计、制造的技术水平和能力。生产规模较大的汽车生产企业一般都有模具设计和制造部门，进行冲压工艺设计时应加以充分利用，降低模具投人成本。但随着社会化生产的不断发展，模具生产逐渐成为一个行业，所以在设计工艺时，也应考虑在企业具有生产技术水平而模具生产水平不足时，充分利用模具行业的专业生产模具的优势，多选用模具标准件。

5）生产准备周期。生产准备周期的长短是反映企业适应市场能力的重要标志之一，所以在设计冲压工艺时，一定要考虑到工艺所需新增模具对生产准备周期的影响，应力求缩短生产准备周期，增加企业适应市场的能力。

(4) 冲压工艺设计的内容和程序

1）冲压工艺设计主要程序

① 审查零件结构的工艺性，并根据零件设计出拉深件图。

② 根据零件图和拉深件图，确定最合理的工艺方案，确定总工序数、工序顺序、各工序的加工内容、冲压方向等。

③ 根据拉深件的结构、形状尺寸，进行毛坯展开，初步确定毛坯的形状和外形尺寸（在多数情况下，外形尺寸要由试验来决定），制定材料消耗定额。

④ 选定各工序的模具结构形式，选定毛坯和各工序制件的送、卸料方法和方向。

⑤ 计算各工序所需的压力机行程和工作台面尺寸，估测各工序所需的冲压力、压边力、卸料力等，确定各工序所需压力机的型号、数量和生产流程。

⑧ 确定零件及各工序件的检查项目、检查标准和检查方法。

⑦ 确定各工序所需的工位器具、半成品运输方式、废料处理方式等。

⑧ 确定各工序的操作者人数、操作规程、工位布置、工时定额等。

⑨ 编写工艺文件。

2）冲压工艺设计时需要考虑的重点问题。进行覆盖件冲压工艺设计时需要重点考虑的问题如下。

① 成形难度分析。根据拉深件图对拉深件的结构特点、形状尺寸进行变形分析，确定该拉深件的成形难点、难度大小、冲压成形可能出现的质量问题及其发生部位，分析成形的稳定性，然后确定某一部分是用拉深成形还是胀形成形，或是两者的复合。由于对汽车覆盖件的定性分析与计算比较难，所以要参考过去类似零件的有关数据，特别是进行过圆形网目试验的零件的数据。

图 3.5-72 所示是用伸长率 δ 值作为判断不规则形状的汽车覆盖件的成形难度的例子。即在包括最深部分处取间隔 50～100 mm 的纵向断面，用表 3.5-33 所给出的数据和方法，首先判断是否能用胀形成形，不能用纯胀形成形时，要允许有拉深变形，并控制一定的胀形和拉深的比例；当 δ 的平均值超过 30% 或者最大的 δ_{max} 超过 40% 时，还要用成形极限图来判断成形是否有产生破裂的危险性。

表 3.5-33　不规则形状覆盖件的成形难度的判断值

判断值 δ	判　断　项　目
2%	δ 的全部平均值不超过该值时，要获得良好的固定形状是很困难的
5%	50～100 mm 间距上相邻纵向断面的 δ 值之差超过该值时，容易产生皱折
5%	δ 的全部平均值超过该值时，只用胀形是困难的，必须有一定的拉深成形
10%	δ 的最大值超过该值时，只用胀形是困难的，必须有一定的拉深成形

注：这些判断值数据适用于图 3.5-72 所示的纵断面形状（如汽车挡泥板等），对于汽车顶盖及车门等随着凸模端部变得平而浅的零件，则只取表中所列数据的 2/3～1/2。对凸模底部有局部形状的零件不适用。

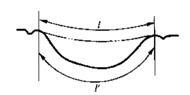


图 3.5-72　成形难度的表示方法

$\delta=(l/l'-1)\times100\%$；

l 为变形前的断面线长度，l' 为变形后的断面线长度

在判断拉深件产生破裂危险的同时，还要判断产生起皱、面畸变等质量问题的危险性。

② 冲压方向。覆盖件各个冲压工序的冲压方向，应能满足该工序冲压成形的需要。必要时，各工序的冲压方向可以不一样；但在能满足冲压工艺要求的前提下，应尽可能使各个工序的冲压方向一致或少变化，以减少操作上和生产准备工作的复杂性。

③ 送料方向。送料方向不仅影响工人操作的安全性和方便性，而且也影响定位的可靠性。



确定送料方向时，通常做法是：工序件有大、小头的，一般是拿住大头往前送；工序件一面是平直、一面带曲线的，一般是拿住平直面往前送；工序件一面浅、一面深的，一般是拿住深的一面往前送。

④ 工序间的定位。在工艺设计中，应认真考虑工序间的定位问题，以保证加工精度和操作的安全及方便。拉深件在修边时的定位，通常有两种方式：能利用拉深件的侧壁或拉深槛定位的，尽量采用侧壁或拉深槛定位；若不能利用拉深件侧壁或拉深槛定位的，则需要在拉深时冲（或刺穿）出工艺孔来定位。

修边以后的定位，一般都采用工序件外形、侧壁或覆盖件上本身的孔来定位。

⑤ 拉深毛坯。通常，对于形状较简单的覆盖件，采用矩形的毛坯拉深；对于形状复杂的覆盖件，则采用封闭落料或局部切角的毛坯拉深。

在水平压料面或曲率较小的下凹形压料面时，一般采用平板的毛坯拉深；但在下模压料面的下凹曲率较大或呈上凸形时，采用平板毛坯就会容易产生毛坯定位不准、在拉深开始阶段就产生毛坯窜动等问题，为避免这种现象发生，通常需要将拉深毛坯预弯成压料面的形状。

⑥ 修边废料的分块。根据修边废料的形状、尺寸大小和操作的安全、方便，确定废料是否分块以及分块的大小和位置。通常，对于较大的覆盖件，采用人工排除废料时，修边废料不宜超过四块，若采用机械排除废料时，要将修边废料分成尺寸小而块数多些，以便于废料处理系统的运输和打包。

修边废料分块的位置，通常选在废料较窄的地方，这样可以减小废料刀的尺寸和保证操作的方便性。

⑦ 成双冲压。对一些尺寸不大的左右对称零件，或者尺寸不大的非对称形状零件，为了改善拉深条件和提高生产效率，减少废料消耗，有时采用成双冲压。

在成双冲压覆盖件时，截断（或切断）以前是使用一套冲模，以后的工序则应采用双槽模（一模两工位）或同一工序的两套冲模安装在同一压力机上，以便流水作业生产。

⑧ 复合工序。在大批量生产时，应尽量考虑采用复合工序，以提高生产效率。

⑨ 冲模联合安装。为了便于流水作业和充分利用大型压力机，有时采取在一台压力机上安装两套成两套以上冲模，使压力机一次行程完成两个或两个以上的工序。

冲模联合安装时，应注意工序件要有足够的流通空间，操作要安全和方便，并符合流水作业的要求。

联合安装冲模的闭合高度应相同，各工位分布要使各冲模受力所形成的受力中心与压力机中心接近，使压力机受力均匀。

在制定冲压工艺时，还要进行所设计工艺的经济性分析评价，工艺、模具结构及自动化方案都必须适应生产量。即工艺水平、模具水平、物流方式、生产方式或新增设备都要以经济性最佳为最终目标。

3）冲压工艺卡。工艺卡中应包括的内容有：产品名称、产品编号、零件名称、零件编号、材料名称型号及厚度、生产车间、工序编号、工序名称、工序内容、所用设备、所用模具、毛坯形状和尺寸、工序件简图（注明加工部位、冲压方向等）、各工序的冲压加工形状和加工部位、各工序的加工基准、操作人员数量、操作位置、工时定额、检查项目、检查工具、检查标准、成品运往地等。

各企业都有自已的设计习惯，所使用的冲压工艺卡格式也不完全相同，表3.5-34是一种覆盖件冲压工艺卡格式。

（5）典型覆盖件冲压工艺实例

1）发动机罩外板冲压工艺主要内容（表3.5-35）。

材料：RRST13ZE75/0—0.5，料厚0.8 mm。

表3.5-34 冲压工艺卡格式

×××××厂 ××××车间	冲压工艺卡	零（部）件图号			
		零（部）件名称		共 页	第 页

零件简图	排料图	工位器具	工序号	编号	名称	数量
		辅助材料				
		使用工序号				

材料要求（牌号、料厚、表面质量和拉深级别）	材料规格	毛坯尺寸	每毛坯可制件数	材料或半成品供应单位	
				半成品或成品发往单位	

	工序号	工序名称及内容	设备		模具或夹具		安全装置	辅助工具或检查工具	工时/min	
			型号	名称	编号	名称			单件工时	准备终结工时
描图										
描校										
底图号										

											设计（日期）	校对（日期）	审核（日期）	标准化（日期）	会签（日期）
装订号															
	标记	处数	更改文件号	签字	日期	标记	处数	更改文件号	签字	日期					

表 3.5-35　发动机罩外板冲压工艺

工序	工艺说明	设备	简图
1	下料 1 320×1 560	开卷线	
2	拉深 镀锌面向上	双动压力机 14 000 kN	
3	修边冲孔 周围修边，冲通风孔	单动压力机 6 000 kN	
4	翻边 周围翻边，通风孔翻口	单动压力机 6 000 kN	
5	翻边 前后翻边	单动压力机 6 000 kN	

2）顶盖冲压工艺主要内容（表 3.5-36）。
材料：ST1405，料厚 0.9 mm。

表 3.5-36　顶盖冲压工艺

工序	工艺说明	设备	简图
1	下料 1 700×2 500	开卷线	
2	拉深 拉深及两侧切边	双动压力机 20 000 kN	
3	修边冲孔	单动压力机 10 000 kN	

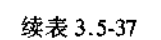
续表 3.5-36

工序	工　艺　说　明	设　　备	简　　图
4	整形翻边	单动压力机 10 000 kN	整形翻边
5	修边冲孔整形	单动压力机 10 000 kN	冲压方向 修边整形 斜楔

3）左/右翼子板冲压工艺主要内容（表 3.5-37）。
材料：ST1405，料厚 0.8 mm。

表 3.5-37　左/右翼子板冲压工艺

工序	工　艺　说　明	设　　备	简　　图
1	下料并落料 0.8（650/1 030）×1 445	开卷线	
2	拉深	双动压力机 14 000 kN	
3	修边冲孔	单动压力机 6 000 kN	异形孔 送料方向 异形孔 2×ϕ9.1
4	翻边　整形	单动压力机 6 000 kN	整形区 整形区 送料方向 翻边整形区


续表 3.5-37

工序	工 艺 说 明	设 备	简 图
5	侧成形	单动压力机 6 000 kN	
6	侧冲孔成形修边	单动压力机 6 000 kN	
7	侧翻边冲孔	单动压力机 6 000 kN	

4）左/右侧围外板冲压工艺主要内容（表 3.5-38）。
材料：ST1405，料厚 0.9 mm。

表 3.5-38 左/右侧围外板冲压工艺

工序	工 艺 说 明	设 备	简 图
1	下料并落料 1 340 × 3 175	下料：开卷线 落料：单动压力机 6 300 kN	
2	拉深	双动压力机 20 000 kN	

续表 3.5-38

工序	工 艺 说 明	设 备	简 图
3	修边冲孔	单动压力机 10 000 kN	
4	翻边整形冲孔	单动压力机 10 000 kN	
5	翻边整形冲孔	单动压力机 10 000 kN	
6	修边冲孔	单动压力机 10 000 kN	
7	修边冲孔整形	单动压力机 10 000 kN	



3.5 拉深成形工艺设计

拉深成形工序是汽车覆盖件冲压成形的关键工序，拉深过程中毛坯的变形复杂，质量问题多，在工艺设计中必须进行多方面细致的考虑，尽量避免在成形中出现问题。

（1）拉深件设计

由于汽车覆盖件的形状复杂，如果直接按冲压件图进行展开来确定毛坯的形状和尺寸，则不能保证覆盖件在冲压成形中能够顺利地成形。因此，在进行冲压工艺设计时，首先要进行拉深件的设计，即根据冲压件零件图设计出拉深件图，然后根据拉深件图展开来确定毛坯的形状和各部位尺寸，制定冲压工艺和模具设计方案。拉深件的设计包括拉深方向的选择、工艺补充和压料面的设计等工作。

1）拉深方向确定。汽车覆盖件拉深成形时，所选择的拉深冲压方向（以下简称拉深方向）是否合理，将直接影响：凸模是否能进入凹模、毛坯的最大变形程度、是否能最大限度地减小拉深件各部分的深度差、是否能使各部分毛坯之间的流动方向和流动速度差比较小、变形是否均匀、是否能充分发挥材料的塑性变形能力、是否有利于防止破裂和起皱等质量问题的产生等。也就是说，只有选择了合理的拉深方向，才能使拉深成形过程顺利实现。

选择合理的拉深方向应考虑以下原则。

① 保证能将拉深件的全部空间形状（包括棱线、肋条和鼓包等）一次拉深出来，不应有凸模接触不到的“死区”，即保证凸模能全部进入凹模。这类问题主要出现在覆盖件的某一部位或局部成凹形或有反方向成形的情况下，为了使凸模能够进入凹模，只有使拉深方向满足凹形或反方向成形的要求。因此，从这一角度来说，覆盖件本身的凹形和反成形的要求决定了拉深方向。

如图 3.5-73a，若选择冲压方向 A，则凸模不能全部进入凹模，造成零件右下部的 a 区成为“死区”，不能成形出所要求的形状。选择冲压方向 B 后，则可以使凸模全部进入凹模，成形出零件的全部形状。图 3.5-73b 表示按拉深件底部的反成形部分最有利于成形面确定的拉深方向，若改变拉深方向则不能保证 90°角。

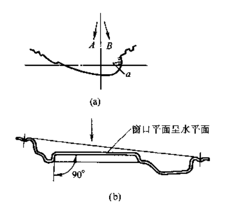


图 3.5-73 拉深方向确定实例

② 尽量使拉深深度差最小，以减小材料流动和变形分布的不均匀性。图 3.5-74a 深度差大，材料流动性差；而按图 3.5-74a 中所示的点划线改变拉深方向后成为图 3.5-74b，使两侧的深度相差较小，材料流动和变形差减小，有利于成形。图 3.5-74c 所示是对一些左右件可利用对称拉深一次两件成形，便于确定合理的拉深方向，使进料阻力均匀。

图 3.5-75 所示是某汽车立柱的拉深方向的确定的例子。若选择与平面法兰垂直的方向作为拉深方向，则由于毛坯与凸模接触时间的差别大，压料面上的进料阻力不均匀，容易造成毛坯与凸模的相对滑动。而将拉深方向按图中所示旋转 6°后，使法兰的高度差减小，压料面上的进料阻力分布趋于均匀，拉深开始时凸模与毛坯的接触线靠近中间，拉深的稳定性较好。

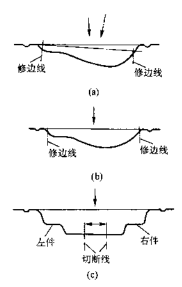


图 3.5-74 拉深深度与拉深方向

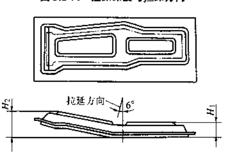


图 3.5-75 某汽车立柱拉深方向的确定

③ 保证凸模与毛坯具有良好的初始接触状态，以减少毛坯与凸模的相对滑动，有利于毛坯的变形，并提高冲压件的表面质量。

凸模与毛坯的接触面积应尽量大，保证较大的面接触，避免因点接触或线接触造成局部材料胀形变形太大而发生破裂（图 3.5-76a）。

凸模两侧的包容角尽可能保持一致（$\alpha=\beta$），即凸模的接触点处在冲模的中心附近，而不偏离一侧，这样有利于拉深过程中法兰上各部位材料较均匀地向凹模内流入（图 3.5-76b）。

凸模表面与毛坯的接触点要多而分散，且尽可能均匀分布，以防止局部变形过大，毛坯与凸模表面产生相对滑动（图 3.5-76c）。

在拉深方向没有选择余地，而凸模与毛坯的接触状态又不理想时，应通过改变压料面来改善凸模与毛坯的接触状态。如图 3.5-76d，通过改变压料面，使凸模与毛坯的接触点增加，接触面积增大，能保证零件的成形质量。

图3.5-77所示为某货车顶盖的拉深方向。若按箭头1所示的拉深方向，虽满足了窗口部分的凸模能够进入凹模的要求，但凸模开始拉深时与毛坯接触面积小而又不在中间，这样在拉深过程中毛坯容易产生开裂和坯料窜动而影响表面质量，因此不能采用。考虑到整个形状的拉深条件，改变为按箭头2所示的拉深方向，其优点是凸模顶部是平的，凹模开始拉深时与毛坯接触面积大而又在中间，有利于拉深，但窗口部分凸模不能进入凹模，则必须改变窗口凹形的形状。即改变成图中所示，从 A 线向左弯成垂直面，在拉深之后的工序中进行整形，保证零件的形状和尺寸。

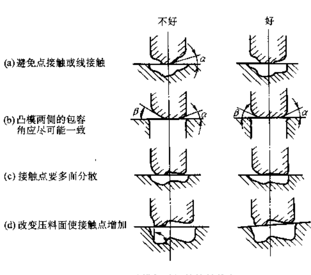


图3.5-76 凸模与毛坯的接触状态

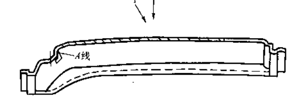


图3.5-77 某货车顶盖的拉深方向的确定

④ 有利于防止表面缺陷。对一些表面件，为了保证其表面质量，在选择拉深方向时，对重要的部分要保证不产生拉深时出现的偏移线、颤动线等表面缺陷。

2）压料面确定。压料面是工艺补充的一个重要组成部分，对汽车覆盖件的拉深成形起着重要作用。根据冲压零件的不同设计出拉深件后，有的拉深件的压料面全部为工艺补充部分，有的拉深件的压料面则由零件的法兰部分和工艺补充部分共同组成。

压料面有两种情况，一种是压料面的一部分就是拉深件的法兰面，这种拉深件的压料面形状是已定的，一般不改变其形状，既使是为了改善拉深成形条件而作局部修改，也要在后工序中进行整形校正。另一种情况是压料面全部属于工艺补充部分。这种情况下，主要以保证良好的拉深成形条件为主要目的进行压料面的设计。同时要考虑到这部分材料在拉深工序后将在修边工序被切除，就应尽量减少这种压料面的材料消耗。

设计压料面应遵循的基本原则有以下几方面。

① 压料面形状尽量简单化，以水平压料面为最好。在保证良好的拉深条件的前提下，为减少材料消耗，也可设计斜面、平滑曲面或平面曲面组合等形状。但尽量不要设计成平面大角度交叉，高度变化剧烈的形状，这些形状的压料面会造成材料流动和塑性变形的极不均匀分布，在拉深成形时产生起皱、堆积、破裂等现象。图3.5-78是几种常用的压料面形式。

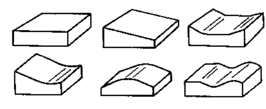


图3.5-78 几种常用的压料面形式

② 水平压料面（图3.5-79a）应用最多，其阻力变化相对容易控制，有利于调模时调整到最有利于拉深成形所需要的最佳压料面阻力状态。向内倾斜的压料面（图3.5-79b），对材料流动阻力较小，可在塑性变形较大的深拉深件的拉深时采用。但为保证压边圈强度，一般控制压料面倾斜角 $\alpha<40°\sim50°$。向外倾斜的压料面（图3.5-79c）的流动阻力最大，对浅拉深件拉深时可增大毛坯的塑性变形。但倾斜角 φ 太大，会使材料流动条件变差，易产生破裂，而且凹模表面磨损严重，影响模具寿命，尽量少选用。

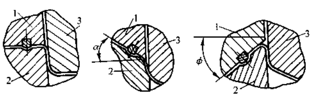


图3.5-79 压料面与冲压方向的关系
1—压边圈；2—凹模；3—凸模

③ 压料面任一断面的曲线长度要小于拉深件内部相应断面的曲线长度。一般认为，汽车覆盖件冲压成形时各断面上的伸长变形量达到3%～5%时，才有较好的形状冻结性，最小伸长变形量不应小于2%。因此，合理的压料面要保证拉深件各断面上的伸长变形量达到3%以上。如果压料面的断面曲线长度 l_0 不小于拉深件内部断面曲线长度 l_1，拉深件上就会出现余料、松弛、皱折等。如图3.5-80所示，要保证 $l_0<0.97l_1$。图3.5-81中要保证压料面的仰角 α 大于凸模仰角 β。若不能满足这一条件，要考虑改变压料面，或在拉深件底部设置肋类成反成形形状吸收余料（图3.5-82）。



图3.5-80 压料面内断面长度与拉深件内断面长度的关系

④ 压料面应使成形深度小且各部分深度接近一致。这种压料面可使材料流动和塑性变形趋于均匀，减小成形难度。同时，用压边圈压住毛坯后，毛坯不产生皱折、扭曲等现象。

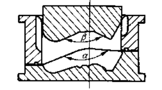


图 3.5-81 压料面仰角与凸模仰角的关系

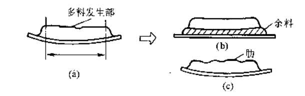


图 3.5-82 防止余料的对策

⑤ 压料面应使毛坯在拉深成形和修边工序中都有可靠的定位，并考虑送料和取件的方便。

⑥ 当覆盖件的底部有反成形形状时，压料面必须高于反成形形状的最高点（图 3.5-83）。否则，在拉深时，毛坯首先与反成形形状接触，定位不稳定，压料面不容易起到压料的作用，容易在成形过程中产生破裂、起皱等现象，不能保证得到合格零件。

⑦ 不在某一方向产生很大的侧向力。在实际工作中，若上述各项原则不能同时达到，应根据具体情况决定取舍。

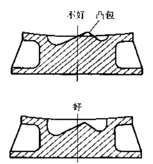


图 3.5-83 底部有反成形形状时的压料面

3）工艺补充。工艺补充是指为了顺利拉深成形出合格的制件、在冲压件的基础上添加的那部分材料。这部分材料是成形需要而不是零件需要，在拉深成形后的修边工序要将工艺补充部分切除掉。工艺补充是拉深件设计的主要内容，不仅对拉深成形起着重要影响，而且对后面的修边、整形、翻边等工序的方案也有影响。

工艺补充部分有两大类：一类是零件内部的工艺补充（简称内工艺补充），即填补内部孔洞，创造适合于拉深成形的良好条件，这部分工艺补充不增加材料消耗，而且在冲内孔后，这部分材料仍可适当利用（如图 3.5-84 中的工艺补充部分 1）；另一类工艺补充是在零件沿轮廓边缘展开（包括翻边的展开部分）的基础上添加上去的，它包括拉深部分的补充和压料面两部分。由于这种工艺补充是在零件的外部增加上去的，称为外工艺补充，是为了选择合理的冲压方向、创造良好的拉深成形条件而增加的，它增加了零件的材料消耗（如图 3.5-84 中的工艺补充部分 2）。

工艺补充部分制定的合理与否，是冲压工艺设计先进与否的重要标志，它直接影响到拉深成形时工艺参数、毛坯的变形条件、变形量大小、变形分布、表面质量、破裂、起皱等质量问题的产生等。工艺补充设计应遵循以下原则。

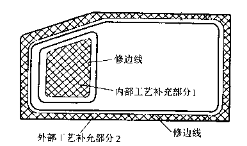


图 3.5-84 工艺补充示意图

① 内孔封闭补充原则。对零件内部的孔首先进行封闭补充，使零件成为无内孔的制件。但对内部的局部成形部分，要进行变形分析，一般这部分成形属于胀形变形，若胀形变形超过材料的极限变形，需要在工艺补充部分预冲孔或切口，以减小胀形变形量。如图 3.5-85a 中，内部工艺补充部分不开工艺孔时的胀形变形量较大，产生破裂。经实验，确定预先冲制出工艺孔的形状、尺寸，改变了拉深成形时的变形分布和变形量，使拉深工序顺利成形。图 3.5-85b 为工艺切口的例子。

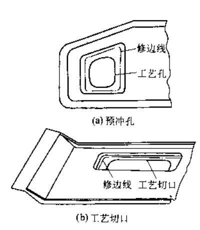


图 3.5-85 工艺补充上预冲孔或工艺切口示意图

② 简化拉深件结构形状原则。拉深件的结构形状越复杂，拉深成形过程中的材料流动和塑性变形就越难控制。所以，零件外部的工艺补充要有利于使拉深件的结构、形状简单化。

图 3.5-86a 中，工艺补充简化了轮廓形状，使压料面的轮廓形状简单，毛坯变形在压料面上的分布比较均匀化，有利于控制毛坯的变形和塑性流动。图 3.5-86b 中的工艺补充增加了局部侧壁高度，使拉深件深度变化比较小，大大减小了塑性流动的不均匀性。

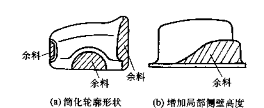


图 3.5-86 工艺补充简化拉深件结构形状实例

图 3.5-87 工艺补充简化了压料面形状，有利于毛坯的均匀流动和均匀变形。

③ 保证良好的塑性变形条件。对某些深度较浅、曲率



较小的汽车覆盖件来说，必须保证毛坯在成形过程中有足够的塑性变形量，才能保证其有较好的形状精度和刚度。如图 3.5-88 所示的斜面较大的拉深件拉深成形时，若选择图 3.5-88a 的工艺补充，因为拉深件没有直壁，凸模上 A 点一直到成形结束时才与毛坯接触。如果压料面上的阻力小，在拉深过程中斜壁部分已形成的皱纹就难以被压平。但若选择图 3.5-88b 的工艺补充，拉深件有一部分直壁，就可以使凹模内部的毛坯在成形的最后阶段受到较大的拉力，减少起皱的可能性。既使产生了一定的起皱，在拉力作用下也会得到减小甚至消除。同时，拉力的增加使凹模内部的毛坯增加了塑性变形量，拉深件的刚度增加。因此，表面质量要求较高的拉深件最好加一段直壁，AB 一般取 10 ~ 20 mm。

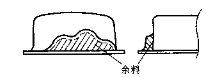


图 3.5-87 简化压料面形状的工艺补充

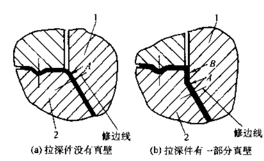


图 3.5-88 工艺补充对变形的影响示意图
1—凸模；2—凹模

④ 外工艺补充部分尽量小。由于外工艺补充不是零件本体，以后将被切掉变成废料，因此在保证拉深件具有良好的拉深条件的前提下，应尽量减少这部分工艺补充，以减少材料浪费，提高材料利用率。

⑤ 对后工序有利原则。设计工艺补充时要考虑对后工序的影响，要有利于后工序的定位稳定性，尽量能够垂直修边等。

拉深件在修边时和修边以后的工序的定位必须在确定拉深件工艺补充部分时进行考虑，一定要有可靠的定位，否则会影响修边和翻边的质量。有的拉深件如汽车前围板、左右车门内根、后围内板等均用拉深件侧壁定位；有的拉深件如顶盖、车门外板、地板等用拉深槛定位；面对一些不能用拉深件侧壁和拉深槛定位的拉深件，则要考虑在工艺补充部分穿刺孔或冲工艺孔来作为下面工序的定位（图 3.5-89）。

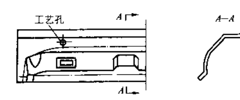


图 3.5-89 某汽车前窗内侧板拉深时冲工艺孔的例子

⑥ 双件拉深工艺补充。有的零件进行拉深工艺补充时，需要增加很多的材料或冲压方向不好选择或变形条件不容易控制等，但如果这种零件不是太大的话，可以考虑将两件通过工艺补充设计成一个拉深件，这种方法称“双件拉深”。

在进行双件拉深的工艺补充时，首先要考虑两件中间部分的工艺补充，即先使两件成为一件，然后按上述原则进行周围部分的工艺补充。

在进行两件中间部位的工艺补充时，要注意：ⅰ）拉深件的拉深方向能够很容易确定。ⅱ）拉深件的深度尽量浅。ⅲ）中间工艺补充部分要有一定的宽度，以便能够保证修边切断模的强度。

图 3.5-90 是成双拉深的工艺补充的一个例子。

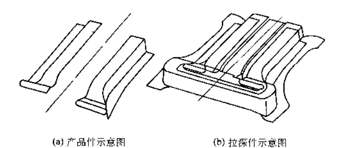


图 3.5-90 成双拉深的工艺补充

图 3.5-91 是常用的几种工艺补充类型。图中有关尺寸主要考虑：

a）在进行模具压料面或拉深筋槽的修理时不能影响到修边线；

b）保证修边模的凸模和凹模能有足够的强度；

c）凸模圆角 r_p 和凹模圆角 r_d 的大小要有利于毛坯的变形和塑性流动等。

图 3.5-91a 所示的修边线在拉深件的压料面上，垂直修边。压料面的一部分就是覆盖件的法兰面。在拉深模使用中，模具压料面要经常进行调整，并且在使用一段时间之后要对已产生磨损的拉深筋和拉深筋槽进行打磨加工，为不使其影响到修边线，一般取修边线到拉深筋的距离 A 为 25 mm。

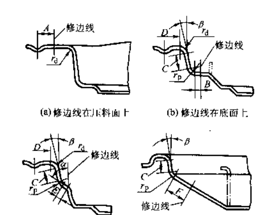
图 3.5-91b 所示的修边线在拉深件的底面上，垂直修边。修边线至凸模圆角的距离 B 应保证在使用中不致因凸模圆角的磨损面影响到修边线，一般取 3 ~ 5 mm；凸模圆角半径 r_p 应根据拉深深度和形状来确定，一般取 3 ~ 10 mm。对拉深深度浅的直线部分取下限；对于拉深深度深的形状部分取上限。凹模圆角半径对拉深毛坯的流动阻力影响很大，其大小必须合适，当凹模圆角半径也是工艺补充的组成部分时，r_d 取 8 ~ 10 mm；当凹模圆角部分本身就是覆盖件的组成部分时，首先要保证拉深成形工艺的要求，若因此而导致 r_d 大于零件要求的圆角半径，则要在以后的工序中进行整圆角。考虑修边模强度，一般取 C = 10 ~ 20 mm；D = 40 ~ 50 mm。

图 3.5-91c 所示为修边线在拉深件翻边展开斜面上，垂直修边。修边方向和修边表面的夹角一般要取 $\alpha \geq 40°$；β = 6° ~ 12°；E = 3 ~ 5 mm；r_p = 3 ~ 5 mm；r_d = (4 ~ 10)t；C = 10 ~ 20 mm；D = 40 ~ 50 mm。

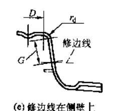
图 3.5-91d 所示为修边线在拉深件的斜面上，垂直修边。修边线按零件翻边轮廓展开。但若翻边轮廓外形复杂，使拉深件轮廓平行于修边线会不利于拉深成形。这种情况下，一般尽量将拉深件轮廓外形补充成规则形状，修边线在不同位置距拉深件轮廓的距离也不同，但要控制 F 的最小尺寸，一般取 $F \geq$ 5 ~ 8 mm；β = 6° ~ 12°；r_p = 3 ~ 10 mm；C = 10 ~ 20 mm。

图 3.5-91e 所示为修边线在侧壁上，水平或倾斜修边。由于增添了工艺补充，修边线一般不会与压料面内轮廓完全

平行，但也要控制 G 的最小尺寸，一般 $G\geqslant 12$ mm；$r_d=(4\sim10)t$；$D=40\sim50$ mm。



(c) 修边线在翻边展开斜面上　(d) 修边线在斜面上



(e) 修边线在侧壁上

图 3.5-91　工艺补充部分的几种类型

(2) 拉深筋设计

拉深筋在汽车覆盖件的拉深成形中占有非常重要的地位。利用拉深筋可以在较大范围里控制变形区毛坯的变形大小和变形分布，抑制破裂、起皱、面畸变等多种冲压质量问题的产生。可以说，在很多情况下，拉深筋设置得是否合理甚至决定着冲压成形的成败。因此，拉深筋设计是汽车覆盖件冲压成形模具设计的重要内容，而且在冲压工艺设计时就必须考虑是否需要布置拉深筋、怎样布置、采用哪种形式的拉深筋等问题。

1) 拉深筋作用。拉深筋的作用力在压料面作用力中占有较大的比例，且可以通过改变拉深筋的参数很容易地改变这种作用力的大小。因此，在汽车覆盖件拉深成形中，拉深筋起着举足轻重的作用。

① 增大进料阻力。压料面上的毛坯在通过拉深筋时要经过四次弯曲和反弯曲，使毛坯向凹模内流动的阻力大大增加，也使凹模内部的毛坯在较大的拉力作用下产生较大的塑性变形，从而可提高覆盖件的刚度和减少由于变形不足而产生的回弹、松弛、扭曲、波纹及收缩等，防止拉深成形时悬空部位的起皱和畸变。

② 调节进料阻力的分布。通过改变压料面上不同部位拉深筋的参数，可以改变不同部位的进料阻力的分布，从而控制压料面上各部位材料向凹模内流动的速度和进料量，调节拉深件各变形区的拉力及其分布，使各变形区按需要的变形方式、变形程度变形。

③ 可以在较大范围内调节进料阻力的大小。在双动压力机上，调节外滑块四个角的高低，只能粗略地调节压边力，并不能完全控制各处的毛坯流入量正好符合覆盖件拉深成形的需要。因此，拉深筋可以配合压边力的调节在较大范围内控制材料的流动情况。

④ 降低对压料面的要求。压料面上设置拉深筋时，相对减小了压料面对进料阻力的影响，可降低对压料面加工光洁度的要求，减少拉深模制造的工作量，缩短模具制造周期。同时，拉深筋的存在可减小压边力，使凹模压料面和压边圈压料面都减少磨损，提高了模具使用寿命。

⑤ 由于拉深筋能够产生相当大的阻力，降低了对压边力的要求，容易调节到冲压成形所需的进料阻力分布，同时也降低了对模具刚度、设备吨位等的要求。

⑥ 拉深筋外侧已经起皱的板料通过拉深筋时可得到一定程度的矫平。

2) 拉深筋结构尺寸。根据拉深筋断面形状不同，拉深筋可分为圆筋（包括半圆筋、劣半圆筋和优半圆筋）、矩形筋、三角形筋和拉深槛等。根据实际应用中的分布情况可将拉深筋分为单筋和重筋两大类。表 3.5-39 所示为常用拉深筋的断面形状及主要用途。

单筋中，一般情况下，圆筋产生的阻力最小，拉深槛产生的阻力较大，常用于允许有较大进料量的冲压成形工艺或冲压件成形部位。而矩形筋、三角形筋产生的阻力更大，一般用于不允许进料或只允许少量进料的胀形工艺的冲压件成形部位。

重筋包括双筋和三重筋，本身形式多为圆筋。在相同几何参数前提下，重筋产生的阻力要大于单筋，三重筋阻力要大于双筋。因此，重筋多用于需要拉深筋阻力较大的成形工艺或冲压件中不允许进料或少量进料的部位。但很多情况下，虽然冲压件的某些部位允许有较大进料量，但为了保证毛坯进入凹模时的平整，也可设置高度较小的重筋。

表 3.5-39　常用拉深筋的断面形状及主要用途

种类		断面形状[①]	用途	特点
圆形筋	单筋	b, r_2, r_1, h $h=3\sim5$ $b=8\sim10$ $r_1=2\sim5$ $r_2=3\sim5$	法兰流入量大时的拉深	修磨容易，便于调节拉深筋阻力
	重筋		法兰流入量很大时的深拉深	为了控制筋的磨损，加大筋槽圆角半径 R。随着 R 增加附加拉力减小，用双筋来弥补

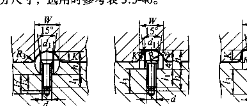


续表 3.5-39

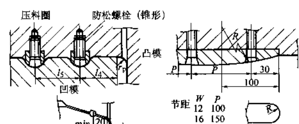
种　类	断　面　形　状①	用　途	特　点
矩形筋	$h=4\sim6$ $b=8\sim10$ $r_1=2$ $r_2=2$	法兰流入量少时的拉深或胀形	与圆筋相比能提供更强的附加拉力
拉深槛（阶梯筋）	$h=4\sim6$ $r_1=2$ $r_2=2$　　$h=4\sim6$ $r_1=2$ $r_2=2$	法兰流入量少时的拉深或胀形	材料利用率高，同样的圆角半径 R 和高度 h 下，比方筋的附加拉力小
三角形筋		胀形	为了抑制筋的磨损，材料完全没有流入

① 本表中所列拉深筋各部分尺寸为日本各汽车公司车体零件成形中实际应用的数值。

拉深筋比拉深槛在采用的数量、形式及调节阻力等方面都更灵活方便，因此应用比较广泛。在拉深成形中使用最多的是圆形筋和方形筋。图 3.5-92 为它们的断面形状及各部分尺寸，选用时参考表 3.5-40。



(a) 圆形嵌入拉深筋　(b) 半圆形嵌入拉深筋　(c) 方形嵌入拉深筋



(d) 双筋　(e) 纵剖面

图 3.5-92　拉深筋断面形状及尺寸

表 3.5-40　各种型式的拉深筋尺寸　mm

名　称	筋宽 W	$d\times p$	d_1	l_1	l_2	l_3	h	K	R	l_4	l_5
圆形嵌入拉深筋	12	M6×1.0	6.4	10	15	18	12	6	6	15	25
	16	M8×1.25	8.4	12	17	20	16	8	8	17	30
	20	M10×1.5	10.4	14	19	22	20	10	10	19	35
半圆形嵌入拉深筋	12	W6×1.0	6.4	10	15	18	11	5	6	15	25
	16	W8×1.25	8.4	12	17	20	13	6.5	8	17	30
	20	W10×1.5	10.4	14	19	22	15	8	10	19	35
方形嵌入拉深筋	12	W6×1.0	6.4	10	15	18	11	5	3	15	25
	16	W8×1.25	8.4	12	17	20	13	6.5	4	17	30
	20	W10×1.5	10.4	14	19	22	15	8	5	19	35

根据拉深件的大小，考虑使用拉深筋的结构如图 3.5-93 所示，其尺寸参数如表 3.5-41。

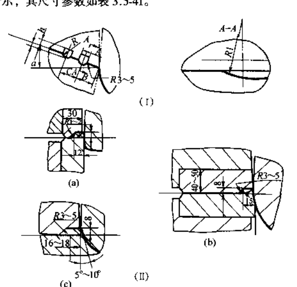


图 3.5-93　拉深筋结构

表 3.5-41　拉深筋的结构尺寸参数　mm

序号	应用范围	A	H	B	C	h	R	R_1
1	中小型拉深件	14	6	25~32	25~30	5	7	125
2	大中型拉深件	16	7	28~35	28~32	6	8	150
3	大型拉深件	20	8	32~38	32~38	7	10	150

当布置非封闭的多重拉深筋时，拉深筋的末端尺寸关系可选用图 3.5-94 所示的形式。

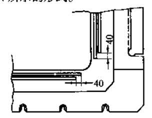


图 3.5-94　拉深筋的末端尺寸关系

3）拉深筋设计。设置拉深筋，最根本的目的是为成形板材提供足够的拉力。此外，也必须考虑其他方面的因素，才能确保冲压件的成形质量。

① 拉深筋形式的设计，不同形式的拉深筋，通过调整几何参数，可以在阻力上完全等效，但在其他方面却不一定能够等效。因此，设计拉深筋时，除了满足阻力要求外，还应考虑以下几个方面的因素。

a）对单筋来说，其结构简单，便于加工和模具调试时拉深筋参数的修正；宽度比较小，可以减小模具尺寸；反力较小，所需压边力可相应减小，能降低对模具刚度和设备刚度的要求。而重筋则结构比较复杂，加工难度大，宽度相对较大，会增加模具尺寸和毛坯尺寸，且模具调试时拉深筋的修正比较困难。因此，一般情况下多选用单筋。

b）在拉深筋使用寿命方面，相同拉深筋阻力条件下，单筋的断面圆弧半径和拉深筋槽的圆角半径相对较小，板材与其接触的表面压力大，易产生磨损，使用寿命相对较短。

c）在对压料面的精度要求方面，重筋由于所占面积相对较大，以满足拉深筋的精度要求为主，可相对降低压料面上其他部位的精度要求；而单筋则不然，既要满足拉深筋的精度要求，也要满足压料面的精度要求。

d）在保证冲压件表面质量方面，相同筋阻力的条件下，重筋的圆弧半径和筋槽的圆角半径均可相应增加，高度减小，从而可减小板材在拉深筋处的变形程度和硬化程度，减小畸变，避免划伤冲压件表面。因此，对表面质量要求较高的冲压件，既使需要较多的进料、阻力要求不是很高，但为确保零件表面质量，也往往采用重筋。

e）在毛坯变形不需要特别大的拉深阻力，且修边线不在压料面部位时，可在凹模口部设置拉深槛，既能保证拉深成形所必需的拉深阻力，又可以减小毛坯尺寸和模具尺寸。

② 拉深筋几何参数的设计。改变拉深筋几何参数，以适应冲压件成形的需要，是模具设计和调试过程中最常用的办法。拉深筋几何参数的设计应从以下几个方面考虑。

a）确保冲压件成形所需的拉深筋阻力。设计时应将拉深筋高度取得大一些，拉深筋和筋槽的半径应取得小一些。实际模具调试时，修正这些参数对改变筋阻力是最有效的。

b）保证冲压件成形质量和表面质量。从成形质量方面考虑，希望有较大的拉深筋阻力来提高冲压件的形状精度和刚度，此时筋的高度应取得大一些，拉深筋和筋槽半径应取得小一些。但半径过小时，会产生冲压件表面压痕或划伤，影响表面质量。综合考虑，可将拉深筋和筋槽半径值放大。同时，筋的高度也进一步适当加大，以补偿因增大筋和筋槽的圆角半径而引起的拉深筋阻力损失。

c）提高拉深筋的使用寿命。在拉深筋设计时应考虑拉深筋的磨损问题，筋和筋槽的圆角半径过小，成形中筋的磨损就会很严重，使拉深筋阻力产生很大变化。因此，应选择适当圆角半径的拉深筋和筋槽，同时相应增大拉深筋的高度。

d）有利于拉深筋的加工和修整。在实际模具调试时，需要对拉深筋和筋槽进行修磨，设计时应留出余量，而且应着重考虑拉深筋的高度。

③ 拉深筋的布置。设计拉深筋的数目及位置时，必须根据拉深件形状特点、拉深深度及材料流动特点等情况而定。根据所要达到的目的不同，拉深筋的布置也不同。表3.5-42列出了拉深筋布置的主要原则。

表 3.5-42　拉深筋布置的主要原则

序号	作用和要求	布置原则
1	增加进料阻力，提高材料变形程度	放整圈的或间断的 1 条拉深槛或 1～3 条拉深筋
2	增加径向拉应力，降低切向压应力，防止毛坯起皱	在容易起皱的部位设置局部的短筋
3	调整进料阻力和进料量	1）拉深深度大的直线部位，放 1～3 条拉深筋 2）拉深深度大的圆弧部位，不放拉深筋 3）拉深深度相差较大时，在深的部位不设拉深筋，浅的部位设筋

以图 3.5-95 为例说明根据拉深件轮廓形状进行拉深筋布置的方法，见表 3.5-43。

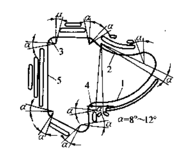


图 3.5-95　拉深件轮廓形状与拉深筋布置

表 3.5-43　根据拉深件轮廓形状进行拉深筋布置的方法

部位	轮廓形状	要求	布置方法
1	大外凸圆弧	补偿变形阻力不足	设置深长筋
2	大内凹圆弧	1）补偿变形阻力不足 2）控制拉深时相邻的外凸圆弧部分的材料向此部分流动的量，避免起皱	设置 1 条长筋和 2 条短筋
3	小外凸圆弧	塑性流动阻力大，应让材料有可能向直线区进行一定的分流	1）不设拉深筋 2）相邻筋的位置与凸圆弧保持 8°～12°的夹角关系
4	小内凹圆弧	将两相邻侧面挤过来的多余材料延展开，保证压料面下的毛坯处于良好状态	1）沿凹模口不设拉深筋 2）在离凹模口较远的位置设两段短筋
5	直线	补偿变形阻力不足	根据直线长短设置 1～3 条拉深筋（长者多设，并呈塔形分布，短者少设）



布置拉深筋时不仅要考虑到拉深件的轮廓形状，还必须与压料面、深度等多种因素综合考虑。

凹模内轮廓的曲率变化不大时，冲压成形中压料面上各部位的变形差别也不很大，但为了补偿变形力的不足，提高材料变形程度，可沿凹模口周边设置封闭的拉深筋。

凹模内轮廓的曲率变化较大时，冲压成形中压料面上各部位的变形差别也会比较大，为了调节压料面上各部位毛坯变形的差异，使之向凹模内流动的速度比较均匀，可沿凹模口周边设置间断式的拉深筋。如图3.5-95，拉深筋的布置随凹模轮廓的变化而变化，在较长的直线段部分5，毛坯产生弯曲变形，压料面作用力最小，布置里长外短的三重筋或两重筋，较短的直线段可设置单筋或两重筋；在外凸形轮廓部分1和部分3，毛坯变形为拉深变形，有切向压应力存在，压料面作用力较大，可沿轮廓形状设置单筋，曲率大的部分不设筋；在内凹轮廓部分2和部分4，毛坯在切向有拉应力存在，可设单筋或不设拉深筋。

若为了增加径向力，减小切向拉应力，防止毛坯起皱，可只在容易起皱的部位设置局部的短拉深筋。

若为了改善压料面上材料塑性流动的不均匀性，可在材料流动速度快的部位设置拉深筋。

对于拉深深度相差较大的冲压件，可在深的部位不设拉深筋，浅的部位设拉深筋（图3.5-96)；并使拉深筋的长度延伸到接近深度大的区域，拉深筋的高度逐渐减小。

对于拉深深度大的圆弧部位可以不设拉深筋。

图3.5-96为发动机油箱底壳拉深件图，该零件拉深深度相差较大。在需要进料少的部位设置拉深筋，以控制该部分向凹模内流入过多的材料，而在拉深深度大的部位不设拉深筋，以便于该部位能有较多的材料流入凹模内，达到成形要求。

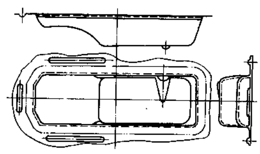


图3.5-96 油箱底壳拉深件上的拉深筋布置

(3) 工艺孔和工艺切口

1) 工艺孔和工艺切口的作用。当进行内工艺补充后，零件的内孔已被封闭，往注形或拉深件内部的反成形形状。这部分形状的成形一般不能靠外部材料进行补充，只能靠该部分毛坯的胀形（即厚度变薄）来实现面积的增大，从而使这部分材料在冲压或形过程中很容易出现破裂，且裂纹扩展到修边线以外（即冲压件上)，甚至整个裂纹都发生在冲压件上。为解决内工艺补充带来的问题，一般采取在拉深毛坯上的适当部位预冲出工艺孔，或拉深过程中在局部变形区的适当部位冲切工艺切口的方法，使容易破裂区域的材料的变形情况得到改善，并可以从相邻区域里得到材料补充，避免破裂的产生。如汽车车门内板、外板、上后围内板、上风窗盖等都采用工艺孔或工艺切口来避免开裂现象。

2) 工艺孔和工艺切口的条件。必须在容易破裂的区域附近设计工艺孔或工艺切口，同时又必须设置在内工艺补充部分上，从而保证在修边之后把这部分全部切掉，不影响覆盖件本体。

3) 工艺孔和工艺切口的制法

① 落料时冲出工艺孔。它用于局部成形深度较浅的场合。

② 拉深过程中切出。它充分利用材料的塑性。即在拉深开始阶段，切口周围区域的材料都产生塑性变形，且以径向伸长变形为主，切向伸长变形较小，然后在切工艺孔或切口后会在切向成为最大变形方向，从而使材料的塑性变形能力得到较大的发挥，成形深度可以加深。

在拉深过程中一般是冲切工艺切口，即不让切口处的材料与本体分离，这样，这部分废料可在后工序中与其他部位的废料一并切除。否则，在拉深模中必须考虑清除废料的问题，这会使拉深模结构复杂，操作困难。

4) 工艺孔或工艺切口的布置原则。工艺孔或工艺切口的大小和形状要视其所处的区域情况和其向外补充材料的要求而定，一般要注意以下几项原则。

① 应与局部成形的形状相适应，以使材料能合理流动。

② 在有多个工艺孔或工艺切口时，它们之间应留有足够的搭边，以使凸模能张紧材料，保证成形出清晰的棱边，并避免出现波纹等缺陷，而且修边后可获得良好的翻边质量。

③ 切口的切断部分（开口）应邻近局部成形部分的边缘或容易产生破裂的区域（图3.5-97、图3.5-98)。

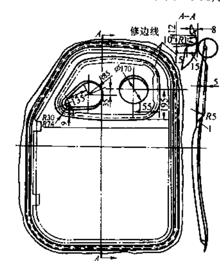


图3.5-97 汽车外门板工艺切口

④ 切口的数量与大小应保证局部成形部分各处材料变形趋于均匀，否则不一定能防止裂纹的产生。如图3.5-98a中，在只有左右两个切口时，中间部位仍然开裂，在增加了中间的切口后，才完全避免了开裂现象。

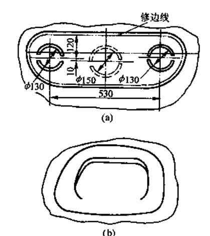


图3.5-98 工艺切口布置

3.6 汽车覆盖件成形模具的调试

(1) 拉深模调试应解决的问题

在进行汽车覆盖件的工艺设计、模具设计时，还不能定量地给出材料在成形过程中的塑性变形规律和计算数据，需要大量地利用工程技术人员的经验来弥补未知因素的不足。显然，经验只能是定性的，不可能是定量的，因而设计出的冲压工艺和模具在很大程度上存在未定因素，这些只能靠模具调试来解决。因此，对汽车覆盖件的冲压成形来说拉深模调试具有重要意义。

汽车覆盖件拉深模在制造完成之后，虽然经装配调试已试冲出基本合格的拉深件，但拉深模的这种状态还不能保证大批量稳定生产的要求。为使拉深模在投人生产使用时具有稳定生产高质量冲压件的良好性能，还必须进行模具的生产调试。

冲模调试时应主要解决以下问题。

1) 鉴定零件设计和拉深件设计的冲压工艺性。通过模具调试，鉴定冲压零件的冲压工艺性如何，在零件的冲压工艺性极差的情况下，要将此情况反馈到产品设计部分，建议在保证零件必要功能的前提下，适当修正零件的形状与尺寸，改善零件的冲压工艺性，以保证零件的质量和冲压生产的稳定性，或减小冲压难度，降低产品的生产成本。同时，要确定拉深件的形状与尺寸是否合理，不合理的部分要重新进行设计，或在冲模调试时加以修改。

2) 鉴定冲压工艺、冲模结构及模具参数的合理性。冲压工艺设计、冲模设计中给出了冲压工艺参数和冲压加工条件等。这些工艺参数和加工条件是否合理，必须通过模具调试来加以验证，并依据质量管理标准中给定的产品质量标准鉴定冲压件的质量和冲模的各种功能，修正其不合适的地方。

3) 确认冲压作业的作业特性和安全特性。在确定冲压作业特性时，要确定模具的安装程序，该作业工序毛坯与冲压件的装卸特性如何，润滑方式及操作方式，该作业工序中模具与机械化或自动化装置的相关性如何，以及它们对稳定批量生产的适应性等。

在确定冲压作业的安全性时，要确定操作者在冲压作业时的安全性，设备连续运行工作时的安全性，以及模具在连续工作中的安全性等。

4) 确定选材。冲压件的材料一般在进行产品设计时就进行了选择，这时主要是从零件的使用性能要求等方面来考虑的，但这种选择不可能详细地考虑板材的加工性能，在进行冲压工艺设计和冲模设计时给出了毛坯的形状和尺寸，对汽车覆盖件一般只给出大概的毛坯形状与尺寸。因此，在冲模调试过程中，要根据冲压件的质量要求、板材冲压性能和冲压变形特点确定板材的品种和毛坯的形状与尺寸，使之能够既符合零件的功能和质量要求，又能使冲压生产稳定性好，成本低。

5) 确认作业顺序。作业顺序表是对操作工人进行冲压作业的技术文件要求。其内容有的部分是在工艺设计和模具设计时给出的，还有一部分是在冲模调试时确定的。其主要内容包括：设备、模具、毛坯的准备、冲压条件的确定、加工操作顺序、模具装卸顺序以及进行各项工作所需要的时间、操作人数、加工节奏、工作地布置等。这些都要根据工艺文件要求及生产现场的实际情况来确定。然后将这些内容汇总成冲压作业顺序表。

6) 确定生产效率和生产成本。在冲模调试时，还要根据冲压作业的情况（如设备、模具、材料、润滑、操作者等）来确定生产节奏、生产效率，并核算生产成本。

7) 确定模具维修保养所必须的项目及其准备工作。为保证生产效率、生产高质量的冲压件，必须使模具处于良好的工作状态。所以，在模具调试时，要研究该模具的正常磨损及不生产时的维修方案，模具拆装和更换易损零件的难易程度，制定长期的模具维修计划。

8) 整理有关资料。模具调试结束后，模具调试人员要将各项工作汇总成技术资料，进行存档，为以后该模具维修后进行调试时提供参考资料。同时要将这些资料反馈给技术部门，作为以后进行零件、工艺、模具设计和模具制造的参考，反馈给生产部门作为生产组织、成本核算的参考。同时也为今后的技术和生产工作积累经验。

(2) 调试程序

1) 模具调试前的准备工作

① 认真研读技术文件。调试人员在进行模具调试之前要认真研读冲压工艺文件和冲模设计图样，不仅要了解该工序的作业内容，而且要充分理解设计思想，明确该冲压件在该工序中的质量要求、技术要求和技术特点、模具的结构特点、作业顺序和特点以及该工序对后工序的影响等。

② 分析冲压件变形特点。汽车覆盖件拉深成形的变形十分复杂，在拉深模调试之前要对拉深件的变形特点进行尽量详细的分析，找出其变形特点、可能出现的质量问题及部位。

③ 毛坯准备。根据工艺文件所要求的板材型号、形状、尺寸准备好毛坯，同时准备几种比工艺文件所要求的性能好或差的板材作为选材备用。

为分析冲压件可能产生问题的原因并找出解决办法，必须了解毛坯在冲压成形过程中的变形情况。因此，在调试之前，应在毛坯上对应可能出现问题的部位制出网格（可用划线法、感光复制法、电蚀法等），以便在试压后测量毛坯的变形情况。

④ 成形极限图的准备。汽车覆盖件拉深成形时，凹模内的毛坯一般产生双向拉应力下的塑性变形，对这种塑性变形不能用单向拉伸时的塑性变形指标来衡量，而应用表示板材在双向拉应力下的塑性变形能力的成形极限图来衡量。因此，为解决调试时出现的塑性破坏问题，选择合理材料，应提前准备好相关板材的成形极限图。

⑤ 设备的准备。调试前，要按照模具安装要求调整好压力机的闭合高度、校平压力机滑块、气垫或液压缸压力、顶杆数量和长度等，并进行数次空行程运行，确认设备处于良好状态。

2) 冲模调试

① 空行程调试。安装好模具，在进行正式试冲之前，要利用压力机的寸动功能使滑块上下运动几次，确认上下模具工作部分、导向部分的接触情况，调节压边力、顶出缸行程等。

② 试压。用工艺文件给出的形状和尺寸及已制上网格的毛坯，采用阶段拉深法进行试压。

根据制件结构特点可将其深度分成三段或四段，如图3.5-99所示，$h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4$。即把制件总深度分成几次拉深来完成，第一次拉深深度为 h_1，将毛坯拿出模具后，对欲知变形部位进行网格测量；然后再将毛坯放人模具进行第二段 h_2 的拉深，拿出毛坯进行与第一阶段相同部位的网格测量（若发现与预测不同的问题，可及时调整测量部位）……，直至最后成形出制件，进行最后一次网格测量。

③ 绘制变形状态图。用分段试冲后测量得到的数据进行计算，得出两个主应变值 ε_1 和 ε_2，在应变坐标系中确定一个坐标点。将一个测量点在各阶段的应变坐标点连接，这条折线就是该测量点的变形路径；将同一阶段各测量点的应变坐标相连，就是该变形时刻的应变状态曲线（简称 SCV）。图3.5-100是某汽车后挡泥板的 SCV 图（测量区域见图中所示）。



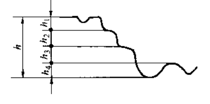


图 3.5-99 试冲分段示意图

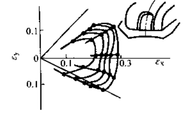


图 3.5-100 某汽车后挡泥板 SCV 图

④ 利用 SCV 和 FLD 分析问题。利用 SCV 和 FLD 可以对拉深成形过程中产生的双向拉应力下的塑性破裂问题、选择合理冲压材料等进行分析，找出解决问题的措施。

如图 3.5-101 所示，将材料的 FLD 和 SCV 曲线画在同一坐标系中，进行比较可见，图中的 SCV 曲线上的 A 点已与该材料的 FLD 曲线相重合，该点产生破裂。它处于两向伸长的变形状态，要使 A 远离破裂边缘，就要减小 ε_1 值或增大 ε_2 值；对于 B 点，它处于平面应变状态，这种状态下的变形极限最小，减小 ε_1 值、增大或减小 ε_2 的值，都可以解决这一破裂问题；对于 C 点，它处于一向伸长，一向压缩的变形状态，故只有减小 ε_1 值或减小 ε_2 的值才能解决这一破裂问题。

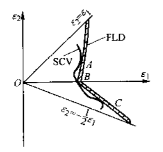


图 3.5-101 利用 FLD 和 SCV 解决破裂问题

通过利用 FLD 和 SCV 进行变形状态分析，可以清楚地知道改善毛坯变形状态的方向，按照这样一个方向制定修正模具参数、改变毛坯形状尺寸、改变冲压条件等具体措施，可以减小或避免盲目性，提高模具调试的效率。

在制定解决冲压质量问题的具体措施时，首先要考虑是否有减小毛坯尺寸的可能，如果有可能，将可以提高材料利用率，降低生产成本；其次要考虑通过改变压边力、润滑部位、润滑方式等冲压条件解决质量问题，这样可以缩短冲模调试周期；在前两类措施都不能奏效的情况下，必须通过调整拉深筋、压料面、凸凹模圆角等模具参数来改善毛坯的流动和塑性变形条件，达到解决冲压质量问题的目的。

利用 FLD 和 SCV 从防止破裂的角度判断材料的合理性如何，选择比较合理的材料，既可以充分满足冲压生产的要求，又能充分发挥材料的塑性变形能力，使制件的材料成本较低。

通过 SCV 变形分析，找出起皱的主要产生原因，判定起皱是属于哪一类应力引起的，制定相应的调整模具措施解决起皱问题。同时，通过 SCV 图还可以了解材料堆积、松弛、弹性回复等问题产生部位的变形状态、分析其产生原因，制定解决措施。

在解决了所有的冲压质量问题之后，拉深毛坯的形状与尺寸也最后确定下来了，这时才能在凹模面上确定挡料销的位置，并钻孔安装挡料销。同时在压边圈上相应的部位钻出挡料销的躲避孔。

在双动压力机上调试拉深模的步骤，可以用表 3.5-44 来表示。

表 3.5-44 双动压力机上调试拉深模的程序

序号	内 容	说 明
1	校平压力机滑块	调节外滑块四个角的调整螺母，使外滑块处于水平位置
2	研修压料面和拉深筋槽	用试冲毛坯着色研配，以保证各处间隙均匀。尤其在斜面和圆角处，由于在研配压力机上研修时一般不垫以坯料，因此，工作时会在该处出现间隙小于毛坯厚度的情况
3	研修凹模	按凸模研修凹模（用毛坯着色研配），保证凸模与凹模之间的料厚间隙（特别注意斜面和圆角处）
4	抛光	将研修好的压料面、拉深筋槽及凹模圆角等处抛光，并擦拭干净
5	试冲和调整	用图样规定的毛坯材料（钢号、级别、表面质量和厚度等）进行试冲，并根据试冲过程中出现的拉深件缺陷，分析其产生的原因，设法加以消除，最后冲出合格的拉深件来
6	装挡料销	根据拉深毛坯确定挡料销位置，并将此位置反印到压边圈上去，在压边圈上钻躲避孔。反印挡料销位置的方法是：将 $\phi4\sim\phi6$ 的钢珠用油泥或洋冲眼固定在凹模的确定位置上，然后把外滑块稍回升一点，开动压力机，即可在压边圈上压出印痕
7	凹模热处理	在凹模的圆角、棱线、凸包和筋等处进行火焰淬火

通过拉深模调试，改变毛坯的受力状态、变形状态，抑制破裂、起皱等问题的产生，将压料面的作用力调整到最适合于拉深成形的状态。调整压料面作用力的主要手段如表 3.5-45。

模具经过调试冲制出合格冲压件之后，一般要进行至少 30 件的连续冲压，以检查冲压条件、模具参数等是否能稳定地生产出合格零件。

为便于拉深模调试时修模，拉深凹模一般不进行淬硬处理，当模具调试完毕之后，要对拉深凹模的圆角、棱线、凸包和拉深筋等处进行火焰淬火。

在进行模具调试的同时，还要确认冲压作业特性、安全特性、作业顺序等。

表 3.5-46 是拉深模调试时常见的拉深缺陷和解决办法。

(3) 建立模具调试档案

模具调试完毕后，要对调模记录进行归纳、综合，形成技术文件，并随同模具技术资料一同存档保存，同时要把有关问题及时反馈给生产部门以利于大批量稳定生产；反馈给有关技术部门和模具制造部门，作为以后设计和制造部门进行类似件设计和模具制造的参考资料。



表 3.5-45　调整压料面作用力的基本方法

序号	内　容	说　　明
1	调节压力机外滑块的压力	调节压力机外滑块四个角上的调整螺母，使之达到所需要的压边力
2	调整压料面配合的松紧	压边圈与凹模的压料面，应研至全面接触，以保证其在拉深过程中始终能起压边作用。调整时允许根据进料情况进行研修，让某些部位接触松一些或紧一些；但允许稍有“里紧外松”，而不允许有“里松外紧”的现象
3	调整拉深筋配合的松紧	1）调整拉深筋两边的圆角半径 R。调整时注意保证槽宽 B，槽深可加深，圆角半径应从小逐步调大 2）调整拉深筋的高度 H。拉深筋的高度一般都是 7 mm，调整时可根据需要适当磨低一些；多排筋的高度应从里向外逐个降低。使进料阻力从小到大
4	调整凹模圆角半径	根据试冲件的情况，打磨凹模圆角半径（从小逐步磨大，到适当时为止）
5	改变毛坯形状和尺寸	当拉深已基本拉成后，对于局部的破裂或皱纹，可以用改变毛坯局部形状来解决：如需加大进料阻力，则可将该处的毛坯适当加大；如需减小进料阻力，则将该处的毛坯适当减小
6	适当的润滑	采用润滑效果良好的润滑剂配方，润滑剂应涂刷在四周压料部分。涂刷次数和量应适当。

表 3.5-46　拉深模调试时常见的拉深缺陷和解决办法

拉深件缺陷	产生原因	解决办法
破裂	1）压边力太大 2）凹模口或拉深筋槽的圆角半径太小 3）拉深筋布置不当或间隙太小 4）压料面的表面粗糙度较大 5）凹模与凸模间的间隙过小 6）润滑不足 7）毛坯放偏 8）毛坯尺寸太大 9）毛坯质量（厚度公差、表面质量、材料级别等）不符合要求 10）局部形状变形条件恶劣	1）减小外滑块的压力 2）加大有关的圆角半径 3）调整拉深筋的数量、位置和间隙 4）减小表面粗糙度 5）调整间隙 6）改善润滑条件 7）使毛坯正确定位，必要时加预弯工序 8）减小毛坯尺寸 9）更换材料 10）加工艺切口或工艺孔，或改变拉深筋的局部形状
皱纹	1）压边力不够 2）压料面“里松外紧” 3）凹模口圆角半径太大 4）拉深筋太少或布置不当 5）润滑油太多或涂刷次数太频，或涂刷位置不当 6）毛坯尺寸太小 7）试冲毛坯过软 8）毛坯定位不稳定 9）压料面形状不当 10）冲压方向不当	1）调节外滑块调整螺母，加大压边力 2）修磨压料面，消除“里松外紧”现象 3）减小圆角半径 4）增加拉深筋，或改变其位置 5）适当减少润滑油，并注意操作 6）加大毛坯尺寸 7）更换试冲材料 8）改善定位，必要时加预弯工序 9）修改压料面形状 10）改变冲压方向，重新设计冲模
修边后形状和尺寸不准确	1）压边力不够 2）拉深筋太少或布置不当 3）材料塑性变形不够 4）材料选择不当 5）产品的工艺性差	1）加大压边力 2）增加拉深筋或改善其分布 3）对于浅拉深件采用拉深槛 4）更换材料 5）产品增加加强筋
有“鼓膜”现象	1）压边力不够 2）拉深筋太少或布置不当 3）毛坯扭曲，拉深时受力不均	1）加大压边力 2）增加拉深筋或改善其分布 3）拉深前将毛坯放在多辊滚压机上进行滚压



续表 3.5-46

拉深件缺陷	产生原因	解决办法
装饰棱线不清，压双印	1）凸模向下行程不够 2）凸模与凹模不同心，间隙不均匀 3）毛坯与凸模有相对运动	1）调节凸模深度，或换大吨位压力机 2）保证凸模与凹模之间的间隙均匀 3）调整各个部位的进料阻力，或改变冲压方向
表面有痕迹和划痕	1）压料面的表面粗糙度较大 2）凹模圆角的表面粗糙度较大 3）镶块的接缝间隙太大 4）毛坯表面有划伤 5）凸模或凹模没有出气孔 6）凹模内有杂物 7）润滑不足或润滑剂质量差 8）工艺补充部分不足 9）冲压方向选择不当，毛坯与凸模有相对运动	1）减小表面粗糙度 2）减小表面粗糙度 3）消除镶块间的缝隙 4）更换材料 5）加出气孔 6）保持模内清洁 7）改善润滑条件 8）增加工艺补充部分 9）改变冲压方向
表面粗糙	钢板表面晶粒度大	1）将板料进行正火处理 2）更换合格材料
表面有滑移线	材料的屈服极限不均匀	1）采用质量好的材料 2）拉深前将材料进行滚压

4 厚板成形

厚板成形一般是指厚度在6 mm以上的板材的冲压成形。厚板成形时的受力与变形特点、成形温度、润滑、质量问题及对模具的要求都与薄板冲压成形有较大区别。

(1) 厚板冲压成形变形特点

薄板冲压成形时，由于板材厚度小，一般认为板厚方向的应力 $\sigma_t \approx 0$，将毛坯的受力状态做平面应力处理。但厚板成形时，若忽略板厚方向的应力，相应的应变计算、变形力计算等都会产生很大的误差。因而，应按三向应力处理。

厚板弯曲、拉深成形过程中，内侧与外侧金属的应力差更大，外层金属所受的拉应力更大，更容易产生破裂。

厚板冲压成形属塑性变形范畴，要求被加工材料具有较高的塑性，较低的屈强比和时效敏感性。一般要求碳素钢的伸长率 $\delta \geqslant 16\%$，屈强比 $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \leqslant 0.70$，低合金高强钢 $\delta \geqslant 14\%$，$\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \leqslant 0.80$，否则成形工艺性能差，需采取一定的工艺措施。

(2) 成形温度

厚板成形时所需要的变形力很大。一般地，较小的厚板件采用冷冲压成形，而对中、大型的厚板零件需要通过对毛坯加热，降低毛坯的屈服强度，即采用温压或热压冲压成形方法。除产品设计上特殊要求成形温度外，一般要根据材料的力学性能、厚度、变形程度、精度要求以及设备能力、模具状况等确定成形温度。同时应考虑材料的原始热处理状态和工件的最终使用要求。

1）冷压成形。金属在常温下变形的优点是：不需加热，无氧化皮，成形精度高，操作方便，节约能源；但冷作硬化严重，变形抗力增大，塑性指标降低，常需要进行工序前、工序间及最终热处理，达到软化或消除残余应力的目的。

2）热压成形。将毛坯加热到再结晶温度以上进行的冲压成形称为热压成形。其优点是：再结晶作用可消除金属变形过程中残余应力，避免冷作硬化，增加材料的塑性，降低屈服根限，减少设备的能量消耗。但在高温下操作条件较差，工件表面易产生氧化皮。另一方面，由于热压收缩率受很多因素的影响，工件的形状和尺寸精度不易控制。

表3.5-47和表3.5-48为部分常用材料的热压温度和高温抗拉强度数值。

3）温压。温压是将毛坯在再结晶温度以下加热后进行的冲压加工。温压可以在一定程度上改善金属在冲压过程中的塑性，降低变形抵抗力，又可避免产生过厚的氧化皮。温压成形必须避开金属的蓝脆区。一般钢材的蓝脆温度为200～300℃，而黄铜在温度200～400℃时塑性最差。

(3) 厚板成形润滑

无论厚板冷压成形还是热压成形，都必须进行润滑，良好的润滑剂对减小变形力、保证良好的零件表面质量是非常重要的。表3.5-49为常用的几种厚板成形润滑剂。

(4) 常见厚板成形质量问题

1）冷压回弹。厚板冷压成形时，成形件脱模后会产生回弹，这种回弹的基本特点和规律与薄板成形时的回弹基本相同。厚板成形时的回弹量通常采用估算和试验修正相结合的方法来确定。例如，冷压壁厚为6 mm的碳钢封头，其直径回弹率为0.25%～0.40%，而冷压同样壁厚的不锈钢封头，其直径回弹率为0.40%～0.60%。

2）热压收缩。在厚板热冲压过程中，工件在高温下成形，成形后随着温度的降低，工件尺寸也随之缩小，这种现象称为热压收缩。热压收缩率与工件的材料、形状、尺寸、脱模温度以及冷却条件等因素有关，热压收缩率 δ' 按下式计算：

$$\delta' = \alpha \Delta t \tag{3.5-9}$$

式中，α 为材料的线膨胀系数，$℃^{-1}$；Δt 为脱模温度与室温之差值，℃。

3）开裂。无论是冷压还是热压，厚板成形过程中都可能出现开裂现象。开裂现象的产生与板材的厚度、板材的塑性变形能力、成形温度、模具结构、润滑方式、变形量等因素有关。

一般来说，厚度越大，毛坯变形区的最大变形量越大，越容易产生开裂；板材的塑性变形能力越差，越容易开裂；热压时的成形温度低，材料的塑性变形能力差，容易开裂，同时，材料在蓝脆区的塑性变形能力差，也容易产生开裂；润滑不良或不均匀，模具间隙过小等都容易引起开裂。

4）表面质量。热压成形时，毛坯加热所产生的氧化皮、毛坯与模具的热摩擦、粘结、润滑剂等都会使热压成形件的表面质量降低。



表 3.5-47　常用材料的热压温度范围

材料牌号	热压温度/℃	
	加热	终压（不低于）
QA235A（A3），QA235AR（A3R），15，20，20 g，22 g	900～1 050	700
Q345（16Mn，16MnRE），Q390（15MnV，15MnTi），14MnMoV，18MnMoNb，Q420（15MnVN）	950～1 050	750
Cr5Mo，12CrMo，15CrMo	900～1 000	
14MnMoVBRE，12MnCrNiMoVCu	1 000～1 100	850
14MnMoNbB		750
0Cr13，1Cr13		850
1Cr18Ni9Ti，12CrMoV	950～1 000	
17Mn4，19Mn5		
黄铜 H62，H68	600～700	400
铝及铝合金	350～420	250
工业纯钛	420～560	350
钛合金	600～700	500

表 3.5-48　部分材料的高温强度极限 σ_b 参考值　　MPa

材料牌号＼温度/℃	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000	1 050	1 100
Q235A（A3）	167	127	98	74	64		59	54	44	39	31
10，15	206		108	74	72		62		49		34
20，25			127	98			83		59		
30	235		137	118	98		85		66		34
20 g	216		119		83		72	59	49		37
22 g		196	147	118	98	96	84		59		43
18MnMoNb							76	57	46		
14MnMoV，20MnMoV							78	65			
1Cr18Ni9Ti			314		147		83		49		20

表 3.5-49　厚板成形用润滑剂

工件材料	润滑剂
碳素钢	石墨粉＋润滑油（调成糊状）
不锈钢	石墨粉＋润滑油；滑石粉＋润滑油＋肥皂水
铝	机油；工业凡士林
钛	二硫化钼；石墨粉＋云母粉＋水；云母布

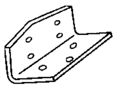
4.1　厚板零件成形工艺

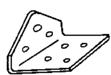
（1）弯曲成形

1）中、小型厚板件弯曲成形。中小型厚板件多用于支承件，比铸件具有重量轻、结构简单、强度高等优点。这类零件一般用冷压工艺成形，其基本成形规律及弯曲模具结构与薄板弯曲成形相同。

图 3.5-102 为几种典型的厚板零件（$t=5\sim6$ mm），一般用 V 形弯曲或 U 形弯曲冷压成形。

图 3.5-103 为汽车横梁零件，材料为 16Mn，板厚 $t=8\sim10$ mm，一般为冷压弯曲成形。





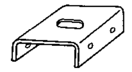


图 3.5-102　典型厚板零件

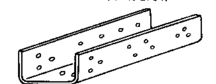
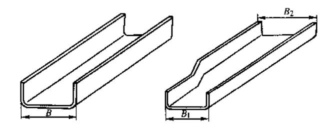


图 3.5-103　汽车横梁



2）大型厚板件弯曲成形。图3.5-104为载重汽车纵梁零件，材料为16Mn，板厚 $t=8\sim10$ mm。图3.5-104a为等截面纵梁，一般采用冷压弯曲成形，也可采用辊压方法成形。图3.5-104b为变截面纵梁，一般采用冷压弯曲成形，弯曲力很大，一般采用30 000～50 000 kN压力机冷压成形，由于截面变化，常出现底部翘曲、侧壁扭曲等质量问题。



(a) 等截面纵梁　(b) 变截面纵梁

图3.5-104　载重车纵梁零件简图

（2）拉深成形

1）汽车驱动桥壳拉深成形。图3.5-105为载重车驱动桥壳零件示意图。两件桥壳零件成形并经机加工后焊接装配成一个完整桥壳。板厚 $t=6$ mm的桥壳零件多采用冷压拉深成形；板厚 $t\geqslant8$ mm的桥壳零件多采用热压拉深成形，毛坯加热温度一般为900℃左右，拉深成形温度一般在820～880℃。

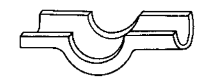


图3.5-105　桥壳零件示意图

2）封头拉深成形。封头是锅炉和炼油、化工设备等受压容器上的重要构件。封头按其形状可分为平底形封头、碟形封头、椭圆形封头及球形封头，有时还采用拱形盖封头。图3.5-106为整体封头的一般拉深过程。

① 拉深方法。$8t\leqslant D_0-D_p\leqslant45t$ 的封头称为中壁厚封头（D_0 为毛坯直径，D_p 为封头内径），用一般拉深方法便可一次拉深成形。

$D_0-D_p>45t$ 的封头称为薄壁封头。这类封头成形较难，用一般拉深方法容易出现鼓包、皱折或拉断等缺陷，可采用表3.5-50所示方法拉深。

$D_0-D_p<8t$ 的封头称为厚壁头封头，这类封头多为球形封头。在拉深过程中，其直边急剧增厚，尤其是直边长度在100 mm以上时增厚更为严重，其增厚率可达10%以上，容易导致封头底部严重变薄。在设计模具时，应适当增大模具间隙，或将坯料边缘按图3.5-107削薄后进行拉深。

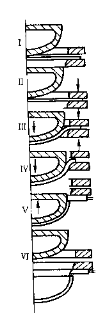


图3.5-106　封头拉深过程

② 不锈钢及非铁金属封头拉深。这类封头的拉深工艺要点见表3.5-51。

③ 多层封头拉深。某些产品功能要求用多层封头，或在缺少厚板的情况下，需要薄板多层封头代替厚板封头。当设备能力足够时，可采用重叠一次拉深法成形多层封头（图3.5-108a），当设备能力不够时，则采用逐层包扎拉深法（图3.5-108b）。

表3.5-50　薄壁封头拉深方法

拉深方法	简　图	说　明	适用范围
多次拉深	I　D_p　D_p-200 II　D_p　(D_p+2t-C)	第一次：用比凸模直径小200 mm左右的模拉深成碟子形状。为提高效率可将2～3块坯料叠起来预成形 第二次：用终成形凹模拉深成合格的封头 必要时可分三次以上的多次拉深	$40t<D_p-D_n<100t$

拉深方法	简图	说明	适用范围
带拉深筋拉深		用拉深筋增大毛坯径向拉应力，以提高压边效果	适宜冷压 $40t < D_p - D_n < 160t$
用锥面压边圈拉深		将压边圈及凹模工作平面做成圆锥面，可改善拉深变形情况	$40t < D_p - D_n < 60t$
反拉深法		坯料在变形过程中受正反两次拉深变形，产生很大的径向拉应力，防止封头鼓包和皱折，并能减少工序数目	$60t < D_p - D_n < 120t$
夹板拉深法	夹板 工件	将坯料夹在两块厚钢板中间，或将坯料贴在一块厚板之上，周边焊成一整体，然后加热拉深	$t < 4$ mm 的贵重金属或不宜直接与火焰接触的材料
加大坯料拉深法		常与多次拉深法一起使用，最后将法兰及直边皱折部分割去，封头最终一次拉深常采用冷压。坯料应比计算直径大 10% ~ 15% 左右，但不大于 300 mm	$60t < D_p - D_n < 160t$

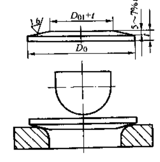


图 3.5-107　厚壁封头拉深

逐层包扎拉深法是：先拉深出第一层封头，之后不脱模，以此作为上模继续拉深第二层、第三层、……，每次只更换相应的凹模。为了保证各层紧密结合，在坯料加热时应仔细清理表面的氧化皮，并涂以高温保护剂。

(3) 胀形成形

1) 整体桥壳胀形成形。采用胀形成形方法可成形整体桥壳零件。这种成形方法所用毛坯可以是圆管，也可以将两件用厚板压弯成半圆形的工件焊接在一起形成管状毛坯。将管状毛坯的两端密封，在管内通以高压气体或高压液体，还可在管坯两端施以轴向压力，使毛坯直径增大，中间部位形成上下方向为圆形，前后有平面的桥壳零件（图 3.5-109）。

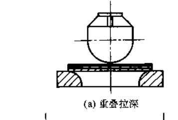
表 3.5-51　不锈钢及非铁金属封头拉深工艺要点

封头材料	拉深工艺要点
不锈钢	1) 在条件允许时以冷压为宜，但当相对壁厚较小时，冷压易产生鼓包缺陷，可采用热压 2) 不锈钢冷却速度快，热压时操作要快 3) 热压时模具最好预热至 300 ~ 350℃ 4) 凹模及压边圈工作表面应保持光洁 5) 要求耐晶间腐蚀的封头，热压后进行奥氏体化处理
铝及铝合金	1) 一般采用冷压，厚度较大时可采用热压 2) 热压时模具最好预热至 250 ~ 320℃ 3) 凹模及压边圈工作表面应保持光洁及良好润滑



续表 3.5-51

封头材料	拉深工艺要点
钛及钛合金	1）采用热压拉深 2）钛材易氧化，坯料加热时应涂以高温保护剂或采用夹板法拉深（表3.5-50） 3）钛材硬化倾向大，要严格控制拉深温度范围 4）钛材对切口等表面缺陷敏感性高，应避免材料有边缘缺口及表面划伤等缺陷 5）拉深变形速度应小于 0.25 m/min
铜及铜合金	1）通常坯料在退火状态下冷压 2）模具工作表面要保持光洁及良好润滑
复合钢板	1）热压温度范围按复层材料制定 2）为防止分层，加热及保温时间适当缩短，拉深时一律采用压边圈，而且操作要迅速


(a) 重叠拉深

(b) 逐层包扎拉深

图 3.5-108 多层封头拉深

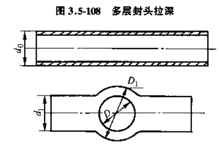


图 3.5-109 整体桥壳成形

2）球体胀形成形。这类零件的成形方法是先将板坯剪切成正五边形或正六边形，再将它们按一定角度焊接成空心多面体。然后向空心多面体内充入高压气体或高压液体进行胀形成形，使多面体经塑性变形后成形为球体零件。

(4) 翻孔成形

翻孔是指在已冲压成形的零件上预先开出坯料孔，然后用模具进行向外或向内翻成带有直立边缘孔的成形工艺。图 3.5-110 为封头翻孔示意图，封头外翻孔常用于在封头上装焊接管或作为产品变径段之用，内翻孔常作为入孔之用。

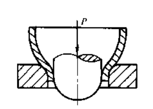
1）坯料预开孔径的确定。在曲面上翻孔，确定坯料预开孔径通常采用放样法。如图 3.5-111 所示，按等长度原则，将弧长 $O\hat{A}$（包括修边余量 Δh）转换成弧长 $O\hat{B}$，便可量得坯料预开孔径 d_0。

2）翻孔系数

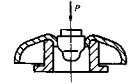
$$K_f = \frac{d_0}{d} \tag{3.5-10}$$

式中，d_0 为预开孔径，mm；d 为翻孔孔径，mm。

热态下碳素钢的极限翻孔系数见表 3.5-52。

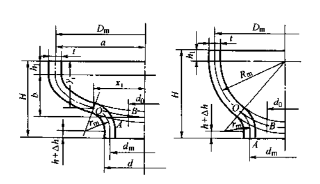


(a) 外翻孔



(b) 内翻孔

图 3.5-110 封头翻孔



(a) 椭圆形封头 (b) 球形封头

图 3.5-111 坯料预开孔径的放样

表 3.5-52　碳素钢圆孔极限翻孔系数 K_f 参考值（热态）

凸模形状	坯料孔加工方式	d_0/t									
		100	50	35	20	15	10	7	5	3	1
圆锥形	气割后车削	0.67	0.57	0.49	0.42	0.37	0.33	0.31	0.28	0.23	0.18
	气割后砂轮打磨	0.73	0.63	0.55	0.50	0.46	0.43	0.42	0.41	0.40	—
球形	气割后车削	0.70	0.60	0.52	0.45	0.40	0.36	0.33	0.30	0.25	0.20
	气割后砂轮打磨	0.75	0.65	0.57	0.52	0.48	0.45	0.44	0.43	0.42	—
椭圆形	气割后车削	0.80	0.7	0.62	0.57	0.53	0.50	0.49	0.48	0.47	—
	气割后砂轮打磨	0.85	0.75	0.67	0.60	0.55	0.51	0.48	0.45	0.40	—

（5）瓜瓣类工件

1）瓜瓣封头　对于超出压力机能力范围的大型封头，可采用分瓣冲压的方法，即将整个封头分成若干个瓜瓣片，中央留一圆顶部分（图 3.5-112）。

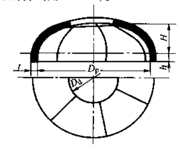
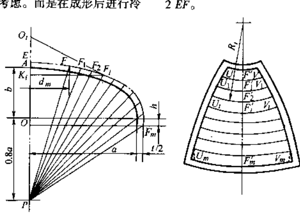


图 3.5-112　瓜瓣封头

① 冲压方式　一般采用热冲压。由于热压收缩率难以控制，故在设计模具时一般不予考虑。而是在成形后进行冷校形，以保证其形状和尺寸的精度要求。

② 坯料尺寸的确定　通常采用放样法。例如：已知椭圆形封头长轴直径 a，短轴直径 b，直边高度 h，壁厚 t，中央圆顶部分的投影直径 d_m。其坯料图的放样法见图 3.5-113。

图 3.5-113a 中：$\widehat{FF_1}=\widehat{F_1F_2}=\cdots\cdots=\widehat{F_{m-1}F_m}$，过任一等分点 F_i 作线段 $F_iO_i\perp F_iP$，$K_iF_i\perp OA$。图 3.5-113b 中：取 $F'F_1'=F_1'F_2'=\cdots\cdots=F_{m-1}'F_m'=\widehat{FF_1}$，过任意点 F_i' 做半径为 $R_i=O_iF_i$ 的圆弧，其长度 $\widehat{U_iV_i}=2\pi K_iF_i/n$（$n$ 为分瓣数目），但在 F'_m 处应加放 10% 的变形收缩量，即 $\widehat{U_mV_m}=1.1\times2\pi\left(a+\frac{t}{2}\right)/n$。圆滑连接 U、U_1、$U_2\cdots U_m$ 及各点 V、V_1、$V_2\cdots V_m$，周边再加放 20～30 mm 的工艺余量，即得单瓣坯料图形。量出 $\widehat{EF}$ 长度，中央圆顶部分坯料直径即为 $D_p=2\,\widehat{EF}$。



(a) 封头断面图　　(b) 坯料图

图 3.5-113　瓜瓣椭圆形封头坯料放样

2）瓜瓣球体。球形容器的直径很大（例如：15 700 mm），只能在制造厂冲压成形瓜瓣球片，然后运抵使用现场组装焊接成一整体。球片的成形工艺可为热压成形和冷压成形两种。

① 球片热压成形。球片热压成形的优点是生产效率高，材料变形均匀，无冷作硬化现象；其缺点是需要大型压力机，坯料加热需消耗能源，而且因为压力机开挡尺寸及一次变形量限制了球片的最大长度尺寸（一般为 4 m 左右），这就增加了产品组装时的焊接工作量（由于增加了球片瓣数）。

图 3.5-114 及图 3.5-115 是球形容器的瓜瓣分布及热压成形模的示意图。

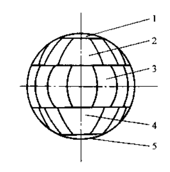


图 3.5-114 球片分布图
1、5—极带；2、4—温带；3—赤道带

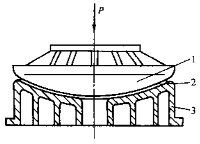


图 3.5-115 热压成形模
1—凸模；2—工件；3—凹模

② 球片冷压成形。球片冷压成形是指在常温下对球片实施逐点压鼓的成形工艺（图 3.5-116）。

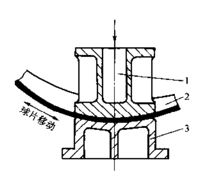


图 3.5-116 冷压成形
1—凸模；2—工件；3—凹模

这种成形工艺的优点是：可利用小吨位压力机冲压大型球片，减少了产品组装焊缝的总长度；模具尺寸较小；坯料不需加热，节省能源；对于在调质状态下使用的高强度合金钢，为了保护其材料的调质状态必须采用冷压成形工艺。

球片冷压成形的缺点是：冲压效率较低，一张球片的打鼓成形次数需几十次至几百次。另外，材料在冷态下变形产生冷作硬化。

(6) 球带类工件

当球体直径较小，工件批量较大或有特殊要求时，球带类（或圆锥形过渡段）工件采用整体冲压，可提高工件成形精度，减少产品组装及焊接工作量。

球带类（或圆锥形过渡段）工件在整体冲压前预先卷制成一圆锥形坯料，然后在模具中热压成形（图 3.5-117）。

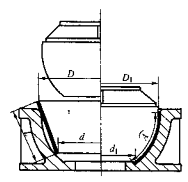


图 3.5-117 球带热压

圆锥形坯料的工艺尺寸为：

锥面母线长度 $L=\widehat{A}+2h_1$

坯料大端内径 $D=D_1+70\sim90$ mm

坯料小端内径 $d=d_1+40\sim60$ mm

式中，h_1 为工艺余量，mm，通常取 $h_1=(2\sim3)t$；$\widehat{A}$ 为球带类工件的母线长度，mm；D_1 为制件大端内径，mm；d_1 为制件小端内径，mm。

加大坯料大、小端的直径，主要是为了保证在成形过程中坯料下滑时，仍能获得需要的工件尺寸。

4.2 厚板零件热成形模具设计

(1) 厚板热成形模具的设计特点（整体封头拉深模）

1）设计凸模与凹模尺寸时，必须考虑到工件热成形冷却后的收缩量。

2）凸模应有脱模斜度，工件脱模方法应简单、方便、可靠。

3）在模具设计结构上要考虑到防止受热变形损坏模具。

4）进出料要方便、迅速，定位装置要保证坯料定位准确。

5）尽量选用自润性好的材料制造凸模与凹模。

(2) 厚板热成形模具设计程序

1）根据产品零件图绘制热冲压工件图。

2）制订冲压温度规范（工件加热温度及脱模温度）。

3）计算和确定坯料尺寸。

4）核算需否压边。

5）计算拉深力和压边力。

6）选择模具结构型式，计算和确定模具主要参数，必要时核算模具强度。

7）绘制模具制造施工图。

(3) 典型模具结构

1）整体凸模式封头拉深模。图 3.5-118 所示为整体凸模式封头拉深模，其结构简单，制造容易。适用于直径在 1 800 mm以下的封头拉深。因采用卸料板进行硬性脱模方式，故对于壁厚小于 10 mm 的大直径封头脱模较困难，工件容易变形。

2）滑套凸模式封头拉深模　图 3.5-119 为滑套凸模式封头拉深模，其上模由凸模体和滑套组成。封头拉深通过凹模后，滑套法兰便托在凹模或压边圈上，当凸模继续下行时，滑套便从封头中抽出，实现自动脱模。这种模具的优点是结构比较简单，自动脱模效果较好，缺点是凸模及其行程较长。

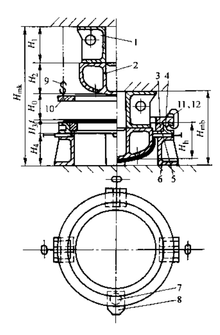


图 3.5-118　整体凸模式封头拉深模

1—托架；2—凸模；3—凹模；4—凹模座；5—卸料板；6—底座；7—管支座；8—塞板；9—铁链；10—压边圈；11—卡子；12—垫铁

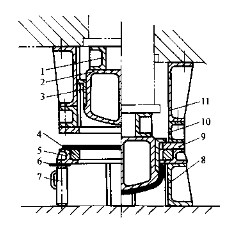


图 3.5-119　滑套凸模式封头拉深模

1—凸模托架；2—凸模体；3—滑套；4—凹模；5—凹模座；6—塞板；7—管支座；8—底座；9—压边圈；10—连接件；11—托架

3）三瓣凸模式封头拉深模　图 3.5-120 所示为三瓣凸模式拉深模，其凸模由托架、锥形芯子、三瓣扇形凸模体以及滑动装置组成。

模具工作过程：当凸模下行拉深坯料时，三瓣扇形凸模体便在坯料变形抗力的作用下沿芯子锥面上升，并张大凸模体直径直至与托架下平面接触，此时凸模便具有需要的几何形状及尺寸，将封头拉深进入凹模。

当凸模回程提升时，三瓣扇形凸模体便沿芯子锥面下滑而缩小整个凸模的直径，此时封头便自动脱离凸模。

脱膜后的封头由压力机下部顶出器通过托盘向上顶出高于凹模上平面时，由吊车吊走。

这种模具适用于直径在 2 000 mm 以上的封头，特别是对于直径大的薄壁封头，更显其脱模方式的优越性，因而能确保工件的冲压质量。缺点是模具结构复杂，加工制造难度较大。

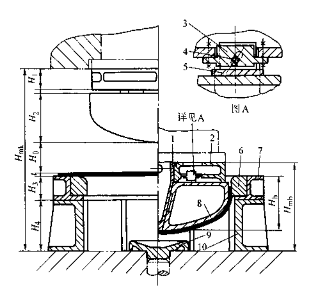


图 3.5-120　三瓣凸模式封头拉深模

1—锥形芯子；2—凸模托架；3—滑块；4—销轴；5—支座；6—凹模；7—凹模座；8—扇形凸模体；9—托盘；10—底座

（4）主要构件设计

1）整体式凸模　设计凸模直径及曲面部分高度时，必须考虑到热压封头冷却后的收缩量。

由于影响热压收缩率的因素很多（例如材料种类、封头直径及壁厚尺寸和脱模温度等），从理论上将会计算出许多相应尺寸的凸模，这在生产管理和经济上都是不现实的。因此在实际生产中，只要妥善地控制各种封头的脱模温度，使其热压收缩率趋近一致，而在控制封头尺寸公差范围的基础上，对于以内径为准的封头，可将直径相同而壁厚不同的封头设计成一个（或两个）通用凸模（图 3.5-121）。对于以外径为准的封头，则设计成一个（或两个）凹模。

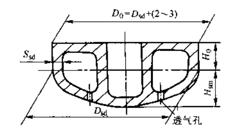


图 3.5-121　整体式凸模

实践表明，封头曲面部分高度方向的热压收缩率与其直径方向相近。

① 凸模直径 D_{sm} 对于以内径为准的封头热压模，其热压收缩率取在凸模上。

$$D_{sm}=D_n(1+\delta')$$

式中，δ' 为封头热压收缩率，可查表 3.5-53。

表 3.5-53 封头热压收缩率 δ′参考值

封头直径/mm	<600	700～1 200	1 300～2 000	>2 000
δ′/%	0.5～0.6	0.6～0.7	0.7～0.85	0.85～1.0

注：1. 薄壁封头取下限，厚壁封头取上限。
2. 不锈钢封头按表值增加 30%～40%。
3. 需调质处理的封头，应另减去处理后的直径胀大量，其值为（0.05%～0.10%）D。

② 凸模曲面部分高度 H_{sm}

$$H_{sm}=H(1+\delta')\qquad(3.5\text{-}11)$$

式中，H 为封头曲面部分高度尺寸，mm。

③ 凸模直边部分高度 H

$$H=H_1+H_2+H_3+H_4\qquad(3.5\text{-}12)$$

式中，H_1 为封头直边部分高度，mm；H_2 为修边余量，mm，一般取 $H_2=(1\sim2)t$；H_3 为模具卸料板厚度，一般取 $H_3=50\sim80$ mm；H_4 为附加保险余量，一般为 50～100 mm。

④ 凸模上部直径 D_0

当设计整体式凸模时，为了脱模顺利，应在凸模直边部分做出 30′斜度，或将凸模上部直径加大 2～4 mm，即

$$D_0=D_{sm}+2\sim4\text{ mm}$$

2）滑套式凸模。如图 3.5-122 所示，凸模的滑套与凸模体应以间隙配合套在一起，两者在直边部分以下 Δh 处衔接。Δh 值以保证能顺利脱模的原则来确定，可参考表 3.5-54。

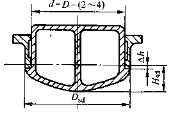


图 3.5-122 滑套式凸模

表 3.5-54 Δh 值 mm

封头直径	<400	400～600	700～900	1 000～1 200	1 300～1 500	1 600～1 800	2 000～2 400	2 600～3 600
Δh	10	15	20	30	40	60	80	100

3）三瓣式凸模。图 3.5-120 中的凸模体由三个扇形瓣组成，通过滑动装置（滑块、销轴和支架）铰链式悬挂在凸模托架上，并依靠芯子锥面将三个扇形瓣撑在一个圆周上。凸模芯子（图 3.5-123）的半锥角 α 一般为 15°～20°，常取 $\alpha=15°$。这样，在凸模下行工作或上行回程时，其直径张大或缩小量为：

$$\Delta D=2h\tan\alpha=2h\tan15°$$

式中，h 为凸模体沿芯子锥面的垂直移动量，一般取 $h=20\sim30$ mm。

4）凹模。为了减小凹模壁厚并保护凹模不被成形力胀裂，常将凹模与凹模座组合使用。当拉深直径相同而壁厚不同的封头时，凹模座可以通用。表 3.5-55 是推荐采用的凹模及凹模座设计系列。

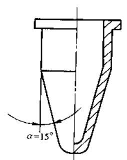


图 3.5-123 凸模芯子

① 凹模内径 D_{xd}

$$D_{xd}=D_{sd}+2t+c\qquad(3.5\text{-}13)$$

式中，c 为模具双边间隙，mm。热冲压时取 $c=(0.1\sim0.2)t$ 或按表 3.5-56 选取。

② 凹模圆角半径 R_d。采用压边装置时 $R_d=(2\sim3)t$；不用压边装置时 $R_d=(3\sim6)t$。

当板厚较大时，因 R_d 计算值较大，有时受凹模高度尺寸的限制，这时可采用双半径或带斜坡的凹模圆角（图 3.5-124）。并取 $R_d=100\sim200$ mm，$\alpha=30°\sim40°$，R_d 和 α 的确定原则是：应用作图法，使双半径或带斜坡的凹模圆角曲率趋近 R_d 计算值的曲率。

③ 凹模工作直边高度 $h=40\sim70$ mm

④ 凹模总高度 $H=90\sim300$ mm

⑤ 凹模外径 $D=D_{xd}+200\sim500$ mm

如果封头尺寸是以外径为准，则热压收缩率取在凹模上，模具间隙则取在凸模上。

⑥ 模具材料

凸模及凹模：铸铁。

凹模座：铸钢。

压边圈：铸铁或铸钢。

⑦ 凹模强度核算。图 3.5-125 所示为凹模工作受力图。

拉深过程表明，在封头接近终成形时凹模受力最大。设此时封头壁部材料受到凸模与凹模的压应力 σ_b（指在接近终成形温度时的材料抗拉强度），而在凹模壁部截面 F 上引起的拉应力为 σ，工件成形作用在凹模壁部（半环）上的总压力为：

$$P_1=0.8D_{xd}h\sigma_b\qquad(3.5\text{-}14)$$

式中，h 为凹模工作直边高度，mm。

此时凹模壁部受总拉力为：

$$P_2=2F\sigma\qquad(3.5\text{-}15)$$

式中，F 为凹模壁部单面截面积，mm²；σ 为作用在截面 F 上的拉应力，MPa。

因为 $P_1=P_2$，所以凹模的强度条件为：

$$\sigma=\frac{P_2}{2F}=\frac{0.8D_{xd}h}{2F}\sigma_b^t\leqslant[\sigma_p]\qquad(3.5\text{-}16)$$

$$[\sigma_p]=\frac{\sigma_b}{n}\qquad(3.5\text{-}17)$$

式中，$[\sigma_p]$ 为凹模材料的许用应力，MPa；σ_b 为凹模材料的抗拉强度，MPa；n 为安全系数，$n=2$。

4.3 缺陷的产生及防止

表 3.5-57 为厚板零件成形时常见缺陷及防止方法。



表 3.5-55 凹模及凹模座设计系列

mm

封头直径	凹模					凹模座						
	D_{xd} 最大	D 基本尺寸	D 公差	H 基本尺寸	H 公差	D_1 基本尺寸	D_1 公差	H_1 基本尺寸	H_1 公差	d_o	D_o	H_o
400	480	629	−0.5	90	−0.3	630	+0.5	90	+0.3	500	900	140
500	590	759				760				610	1 050	
600	720	899	−0.6	120		900	+0.6			740	1 200	
700	850	1 049				1 050		120		870	1 400	180
800	950	1 149	−0.8			1 150	+0.8			970	1 500	
900	1 050	1 429				1 250				1 070	1 600	
1 000	1 150	1 398.5		180		1 400		180		1 170	1 900	250
1 100	1 250	1 498.5				1 500				1 270	2 000	
1 200	1 350	1 598.5				1 600				1 370	2 100	
1 300	1 450	1 698.5				1 700				1 470	2 200	
1 400	1 550	1 798.5				1 800				1 570	2 300	
1 500	1 650	1 898.5				1 900				1 670	2 400	
1 600	1 750	2 048.5		230		2 050	+1.0	230		1 770	2 650	
1 700	1 850	2 148.5				2 150				1 870	2 750	
1 800	1 950	2 248.5				2 250				1 970	2 850	300
1 900	2 050	2 348.5				2 350				2 070	2 950	
2 000	2 150	2 448				2 450				2 170	3 050	
2 100	2 250	2 548				2 550				2 270	3 150	
2 200	2 350	2 748	−1.0			2 750				2 370	3 350	
2 300	2 450	2 848				2 850				2 470	3 450	
2 400	2 550	2 948				2 950				2 570	3 550	
2 500	2 650	3 048				3 050				2 670	3 650	
2 600	2 750	3 148				3 150				2 770	3 750	
2 700	2 850	3 248				3 250				2 870	3 850	
2 800	2 950	3 398		300	−0.5	3 400		300	+0.5	2 970	4 000	380
2 900	3 050	3 498				3 500				3 070	4 100	
3 000	3 150	3 598				3 600				3 170	4 200	
3 100	3 250	3 698				3 700				3 270	4 300	
3 200	3 350	3 798				3 800				3 370	4 400	
3 300	3 450	3 898				3 900				3 470	4 500	
3 400	3 550	3 998				4 000				3 570	4 700	
3 500	3 650	4 098				4 100				3 670		
3 600	3 750	4 198				4 200				3 770		

表 3.5-56 椭圆形封头热压模间隙值

t/mm	设计数据		磨损极限	
	间隙值 c/mm	间隙系数 c/t	间隙值 c/mm	间隙系数 c/t
4～5	0.4	0.10～0.08	0.8	0.20～0.16
6～8	0.7	0.12～0.19	1.3	0.21～0.16



续表 3.5-56

t/mm	设计数据		磨损极限	
	间隙值 c/mm	间隙系数 c/t	间隙值 c/mm	间隙系数 c/t
10~12	1.2	0.12~0.10	2.1	0.21~0.17
14~18	1.7		3.0	
20~24	2.4		4.2	0.21~0.18
26~30	3.2	0.12~0.11	5.5	
32~36	4.0		7.0	0.22~0.20
38~44	5.0	0.13~0.11	8.5	
46~52	6.0	0.13~0.12	10.0	
54~60	7.0		12.0	0.23~0.20
62~70	8.5	0.14~0.12	14.0	
72~80	10.0	0.14~0.13	16.5	0.23~0.21
82~90	12.0	0.15~0.13	18.5	
92~100	15.0	0.16~0.15	21.0	
102~110	17.0	0.17~0.15	23.0	
112~120	19.0	0.17~0.16	26.0	

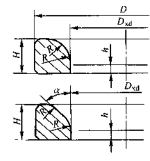


图 3.5-124 特殊圆角凹模

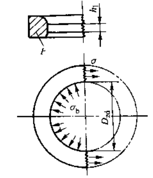


图 3.5-125 凹模受力图

表 3.5-57 厚板零件成形时常见缺陷及防止方法

缺陷名称	图例	产生原因	防止方法
皱折		1）切向压应力大，径向拉应力小，使变形材料失稳而皱折、鼓包 2）加热温度不均匀、压边力不合适或压边力撤得过早 3）模具间隙过大，凹模圆角过大，降低了压边效果	1）加大压边力，增加径向应力 2）采用薄壁封头拉深法 3）保证加热均匀 4）合理选择模具间隙
鼓包			
拉痕、压坑		1）凹模或压边圈工作表面拉毛 2）坯料气割熔渣未清理干净 3）润滑不良	1）采用铸铁凹模，并及时清理模具上粘附的氧化皮及金属屑等杂物 2）清除坯料气割熔渣 3）改善润滑
纵向撕裂		1）坯料边缘有缺口 2）加热不均匀 3）脱模温度过低	1）清理、打磨坯料边缘 2）保证加热均匀 3）控制合理脱模温度



续表 3.5-57

缺陷名称	图　例	产　生　原　因	防　止　方　法
外表面微裂纹		1）坯料加热时间过长 2）凹模圆角半径过小或不光滑 3）凹模温度太低	1）合理制订并遵守加热工艺，采用快加热 2）加大凹模圆角半径并修光滑 3）凹模预热至250～300℃
偏斜		1）坯料定位不准 2）加热温度不均匀 3）模具间隙不均匀	1）确保坯料定位准确 2）保证加热均匀 3）将模具间隙调整均匀
束腰		1）凹模圆角过小 2）压边力过大或施加程序不合适	1）加大凹模圆角半径 2）合理选择压边力，并随着拉深的进行，逐步减小压边力
直径椭圆		1）脱模方法不良 2）热压后未冷却到一定程度就吊运	1）改善模具脱模型式 2）热压后待封头冷却到500℃以下再吊运
直径大小不同		1）脱模温度不一致 2）加热温度不均匀 3）大批量热压时，模具受热膨胀	1）严格控制脱模温度 2）大批量热压时，要有一定的时间间隔冷却模具
形状不合样板		1）冷却收缩不均匀 2）冲压力不足 3）热压后吊运变形	1）进行冷校形 2）加大冲压力
直边不直		1）脱模温度过高，工件从模具中吊运变形 2）冷却收缩不均匀	1）两边先局部压头 2）进行冷校形
扭曲		1）坯料定位不准 2）凹模圆角不光滑	1）保证坯料定位准确 2）修光凹模圆角
不符合样板		1）冷却收缩不均匀 2）工件脱模后放置不合理	1）脱模后注意合理放置 2）进行冷校正
边缘皱折		1）坯料相对厚度小，一次变形量过大 2）工件边缘未压住	1）采用多次冷压成形 2）进行冷校正
边缘撕裂		1）翻孔系数过小 2）坯料孔边缘不光洁 3）加热温度太低或不均匀 4）冷翻孔时材料硬化	1）加大翻孔系数 2）将坯料孔双面倒角，修磨光滑 3）合理选择加热温度并使温度均匀 4）改进翻孔凸模形状
中心偏斜		1）翻孔时定位不准 2）坯料孔开偏	1）采用准确的定位方法 2）使凸模自动定心



5 其他成形方法

5.1 缩口

缩口是将管材或预先成形的空心件的开口端直径加以缩小的一种成形方法。根据不同使用要求，可制出端部为锥形、球形或其他形状的零件，它广泛用于国防、机械和日用品等工业中。

根据零件的特点可以采用不同的缩口方式，如（整体凹模）冲压缩口、旋压缩口、（分瓣凹模）旋转冲击缩口和磁脉冲缩口等。

（1）缩口变形分析

冲压缩口过程如图 3.5-126 所示。在缩口过程中可以将坯料划分成传力区（待变形区）、变形区和已变形区。缩口时，变形区的材料受到切向和轴向的压应力，且主要是受切向压应力作用，使直径缩小，壁厚和高度增加。

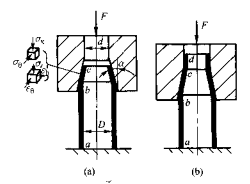


图 3.5-126 缩口成形示意图

由于缩口过程中，变形区主要是切向压缩变形，会使变形区的材料增厚。增厚量最大的部位在口部边缘。口部边缘厚度可由下式求得：

$$t = t_0\sqrt{\frac{d_0}{d}} \qquad (3.5\text{-}18)$$

式中，t_0、d_0 为缩口前的端口壁厚与直径，mm；t、d 为缩口后的端口壁厚与直径，mm。

（2）缩口变形程度

缩口变形程度以切向压缩变形的大小来衡量，用缩口系数 K 表示。

$$K = \frac{d}{d_0} \qquad (3.5\text{-}19)$$

式中，d_0 为缩口前的端口直径，mm；d 为缩口后的端口直径，mm。

K 值越小，变形程度越大，一次缩口变形所允许的最小缩口系数称为极限缩口系数，用 K_{min} 表示。

极限缩口系数 K_{min} 的大小与模具结构型式、凹模锥角、材料类型、相对料厚及摩擦系数等因素有关。一般来说，材料塑性好、相对料厚大、摩擦阻力小、模具对坯料直壁的支承稳定性好，则极限缩口系数就小。

模具对管坯的支承情况分为：无支承缩口、有局部外支承的缩口和有内外支承的缩口三种类型，如图 3.5-127 所示。对于无支承缩口，模具结构简单，但管坯直壁（传力区）的稳定性差，极限缩口系数较大。对于有局部外支承的缩口，此类模具结构较前者复杂，但由于对管坯直壁的支承稳定性好，故可获得较小的极限缩口系数。对于有内外支承的缩口，由于对管坯的支承稳定性最好，因此极限缩口系数可以更小。

极限缩口系数 K_{min} 与凹模半锥角 α 的关系，如图 3.5-128 所示。可见，凹模半锥角过大或过小，均不利于缩口。当凹模锥角较小时，主要是传力区失稳限制了极限缩口变形程度；而当凹模锥角较大时，限制极限缩口变形程度则是变形区失稳。最大的极限缩口变形发生在凹模半锥角为 20°附近。

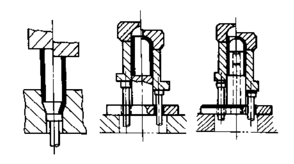


图 3.5-127 模具对管坯的支承情况

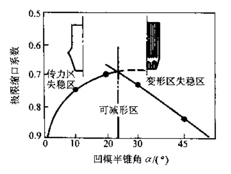


图 3.5-128 极限缩口系数与凹模半锥角的关系

常用的极限缩口系数见表 3.5-58 ~ 表 3.5-60。

表 3.5-58 钢管的极限缩口系数

凹模半锥角 α/(°)	相对料厚 t/D					
	0.02	0.03	0.05	0.08	0.12	0.16
10	0.75	0.72	0.69	0.67	0.65	0.63
20	0.81	0.77	0.73	0.70	0.67	0.64

表 3.5-59 锥形凹模缩口的极限缩口系数

材 料	模具结构型式		
	无支承	外支承	内外支承
软钢	0.70 ~ 0.75	0.55 ~ 0.60	0.30 ~ 0.35
黄铜（H62、H68）	0.65 ~ 0.70	0.50 ~ 0.55	0.27 ~ 0.32
铝	0.68 ~ 0.72	0.53 ~ 0.57	0.27 ~ 0.32
硬铝（退火）	0.73 ~ 0.80	0.60 ~ 0.63	0.35 ~ 0.40
硬铝（淬火）	0.75 ~ 0.80	0.68 ~ 0.72	0.40 ~ 0.43

注：缩口凹模半锥角 α 为 15°，相对料厚 t/D 为 0.02 ~ 0.10。

（3）缩口次数

如果零件的缩口系数小于极限缩口系数 K_{min}，则需要多次缩口。缩口次数 n 可以根据零件总缩口系数 K_z 与平均缩口系数 K_j 来估算，即：

$$n = \frac{\lg K_z}{\lg K_j} \qquad (3.5\text{-}20)$$

可取 $K_j = 1.1K_{min}$。对于第一道工序，$K_1 = 0.9K_j$，以后各道工序，$K_n = (1.05 \sim 1.1)K_j$。



表 3.5-60 球形凹模缩口的极限缩口系数

材料抗拉强度 σ_b/MPa	相对料厚 t/D					
	0.05	0.05～0.02	0.02～0.01	0.01～0.005	0.005～0.003	0.003～0.002
有外部支承的情况						
150	0.48～0.50	0.50～0.52	0.52～0.55	0.56～0.60	0.58～0.61	0.61～0.67
150～250	0.51～0.53	0.52～0.54	0.54～0.57	0.57～0.60	0.60～0.62	0.62～0.67
250～350	0.53～0.55	0.54～0.57	0.57～0.60	0.64～0.67	0.67～0.69	0.69～0.72
350～450	0.57～0.60	0.61～0.64	0.66～0.69	0.70～0.72	0.72～0.74	0.77～0.80
450	0.61～0.64	0.64～0.67	0.68～0.71	0.72～0.74	0.74～0.76	0.78～0.82
有内外支承的情况						
150	0.32～0.34	0.34～0.35	0.35～0.37	0.37～0.39	0.39～0.40	0.40～0.43
150～250	0.36～0.38	0.38～0.40	0.40～0.42	0.42～0.44	0.44～0.46	0.46～0.50
250～350	0.40～0.42	0.42～0.45	0.45～0.48	0.48～0.50	0.50～0.52	0.52～0.56
350～450	0.45～0.48	0.48～0.52	0.56～0.59	0.59～0.62	0.64～0.66	0.66～0.68
450	0.50～0.52	0.52～0.54	0.57～0.60	0.60～0.63	0.66～0.68	0.68～0.77

(4) 典型缩口模具结构

图 3.5-129 为简单缩口模，适用于缩口变形程度较小，相对料厚较大的中小尺寸缩口件。

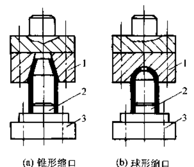


图 3.5-129 简单缩口模
1—凹模；2—定位器；3—下模板

图 3.5-130 是口部有芯棒、外部有机械夹持装置的缩口模。缩口时，管件由上模的夹紧器 2 夹住，提高了传力区直壁的稳定性。夹紧器由两个或等分的三个模块组成，其夹紧动作由上模中的带锥度套筒 5 实现。弹簧 3 起复位作用，使取件、放料方便。上模内装有芯轴 7，不仅可提高缩口部分的内径尺寸精度，而且上模回程时通过弹簧 8 作用可将管件从凹模 6 内推出。

图 3.5-131 为倒挤式缩口模。该模具通用性强，只要更换不同尺寸的凹模 3、导正圈 5 以及凸模 6，就可进行不同孔径的缩口。导正圈主要起导向和定位作用，同时对管坯也起一定的外支承作用。凸模加工成台阶形状，其下部小直径与管坯内径配合，深入管坯内孔起定位导向及内支承作用。冲压时凸模大台阶对管坯加压，使管坯下端进入凹模缩口成形。该类模具主要用于较长管件的缩口，一般在液压机及摩擦压力机上进行。

图 3.5-132 为斜楔式水平缩口模，适用于较长管件的缩口成形。管坯置于支承板 9 上，上模下行时活动压板 7 首先将管坯压紧，起到外支承作用。随着上模继续下行，凹模 3 在斜楔块 4 作用下作水平运动，从而使管端缩口成形。上模回程时，凹模由斜楔块复位。固定在下模板 1 上的挡板 8，起平衡水平力的作用。

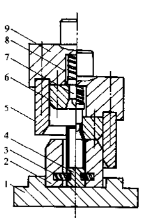


图 3.5-130 口部有芯棒、外部有机械夹持装置的缩口模
1—下模板；2—夹紧器；3—弹簧；4—垫块；5—锥形套筒；6—凹模；7—芯轴；8—弹簧；9—模柄

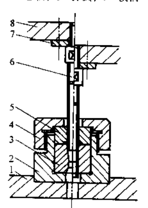


图 3.5-131 倒挤式缩口模
1—下模板；2—凹模套；3—凹模；4—紧固套；5—导正圈；6—凸模；7—垫板；8—上模板

图 3.5-133 为缩口封口复合模。管坯置于下封口凹模 2 上，并由定位圈 3 定位，定位圈兼起外支承作用。缩口凹模 6 由紧固套 4 通过螺纹紧固在模柄 8 上。在压力机滑块下降



过程中，缩口凹模首先对管坯上部从直径 φ25 mm 缩小到 φ22 mm，最后上、下封口凹模 9、2 将管坯两端压成圆角，实现封口成形。上模回程时，打杆 10 推动上封口凹模下行，把管件从上模中卸下。

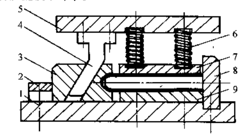


图 3.5-132 斜楔式水平缩口模
1—下模板；2—导向板；3—凹模；4—楔块；5—上模板；6—弹簧；7—活动压板；8—挡板；9—固定支承板

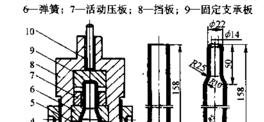
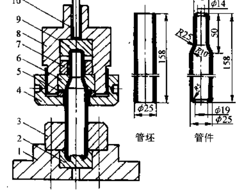



图 3.5-133 缩口封口复合模
1—下模板；2—下封口凹模；3—定位器；4—紧固套；5—垫板；6—缩口凹模；7—垫圈；8—模柄；9—上封口凹模；10—打杆

5.2 扩口

扩口与缩口相反，它是使管材或预先成形的空心件的开口端直径加以扩大的一种成形方法，其中尤以管材扩口为最常见，是管材二次塑性加工的主要方法之一。根据使用要求不同，可制出端部为锥形、筒形或其他形状的零件。管材扩口在管件连接中得到了广泛应用。

根据扩口工艺方法的不同，可分为手工工具扩口、冲压扩口、旋压扩口和磁脉冲扩口等方法。

(1) 扩口变形分析

冲压扩口过程如图 3.5-134 所示。在扩口过程中可以将坯料划分成传力区（待变形区）、变形区和已变形区。扩口时，变形区的材料受到切向拉应力和轴向压应力，且主要是受切向拉应力作用，使直径增加，壁厚和高度减小。

(2) 扩口变形程度

扩口变形程度以最大切向变形来衡量，常用扩口率 ε 或扩口系数 K 来表示：

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0}\times 100\% \qquad (3.5\text{-}21)$$

$$K = \frac{d}{d_0} \qquad (3.5\text{-}22)$$

扩口系数与扩口率的关系为：

$$K = 1+\varepsilon \qquad (3.5\text{-}23)$$

扩口时的根限变形量受到毛坯在变形区破裂和传力区失稳起皱的限制。因此，一次扩口变形程度不能过大，即扩口系数不能过大，其极限变形程度用极限扩口系数 K_{max} 表示。

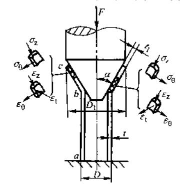


图 3.5-134 冲压扩口示意图

极限扩口系数 K_{max} 的大小与材料类型、模具结构型式、凸模锥角、相对料厚等因素有关。一般来说，材料的伸长率越大，管件相对壁厚越大，管端口加工越光整，模具对管壁传力区的约束条件越好，扩口过程中变形梯度越合理，变形区材料变形抗力越小，则极限扩口系数就越大。

管坯相对壁厚 t_0/d_0 越大，允许的极限变形量也越大，可提高极限扩口系数。例如，钢管扩口时，其极限扩口系数与相对壁厚的经验关系式为

$$K_{max} = 1.35 + 3\frac{t_0}{d_0} \qquad (3.5\text{-}24)$$

式中，t_0、d_0 为管材原始壁厚及直径，mm。

表 3.5-61 为采用半锥角 $\alpha = 20°$ 的刚性模扩口所得到的钢管极限扩口系数 K_{max} 与相对壁厚 t_0/d_0 的实验数据。

表 3.5-61 极限扩口系数 K_{max} 与相对壁厚 t_0/d_0 的关系

t/d_0	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14
K_{max}	1.45	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60

管坯端口的加工质量也直接影响极限扩口系数。粗糙的管口在扩口时，往往由于应力集中现象而导致口部开裂。不利于扩口工艺。因此，一般要求管坯端口光整。

采用的扩口方法不同，其极限扩口系数也不一样。如对变形区采用局部加热扩口方法，就可显著提高扩口系数。

如果扩口坯料为拉深的空心开口件，那么还应考虑预成形的影响及材料方向性的影响。实验证明，随着预成形量的增加，极限扩口率减小。

(3) 常见扩口模具结构

冲压扩口是利用刚性模具对坯料进行扩口加工，使用普通压力机或液压机，生产率高。根据扩口坯料的形状、尺寸、精度要求及生产批量的不同，应采用不同的模具结构形式。

简单扩口模如图 3.5-135 所示，适用于短管坯的扩口加工。图 3.5-135a 所示的模具，由于扩口成形过程中管壁传力区外而没加约束，传力区易丧失稳定，故常用于管坯相对壁厚 t_0/d_0 较大时的扩口加工。图 3.5-135b 所示的模具，由于凹模 3 对管壁传力区有约束作用，故管坯相对壁厚可相应小些。图 3.5-135c 所示的模具，由于凹模 4 做成对开式，夹紧管坯和取出管件很方便，多用于铝合金管件。

有夹紧装置的扩口模如图 3.5-136 所示。凹模做成对开式，固定凹模 8 紧固在下模板 1 上，活动凹模 4 在斜楔 5 作用下作水平运动，以实现夹紧管坯的动作。扩口时，对开式凹模 4、8 将管坯夹紧，提高了传力区管壁的稳定性。扩口完毕后，弹簧 9 起复位作用，使取件、放料方便。

斜楔式水平扩口模如图 3.5-137 所示，由于不受压力机闭合高度的限制，故适用于长管件的扩口加工。

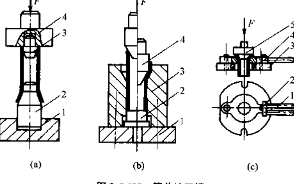


图 3.5-135　简单扩口模

（a）　1—凸模固定板；2—凸模；3—衬块；4—模柄

（b）　1—凹模固定板；2—顶件块；3—凹模；4—凸模

（c）　1—手柄；2—夹紧块；3—底座；4—凹模；5—凸模

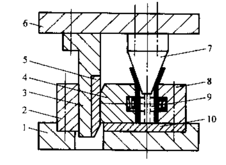


图 3.5-136　有夹紧装置的扩口模

1—下模板；2—挡块；3—斜楔座；
4—活动凹模；5—斜楔；6—上模板；
7—凸模；8—固定凹模；9—弹簧；10—垫板

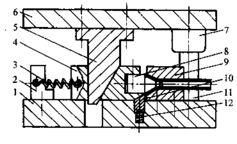


图 3.5-137　斜楔式水平扩口模（结构之一）

1—下模板；2—挡块；3—拉簧；4—滑块；
5—斜楔；6—上模板；7—导套；8—凸模；
9—凹模；10—定位块；11—导柱；12—压簧

管端扩口压平复合模如图 3.5-138 所示。上模采用带斜楔的装置，可在压力机的一次行程中，先将管端扩成喇叭口，然后再压平，从而完成扩口和压平两道工序。该模具使用预成形管件，定位可靠，操作简单，生产效率高。在工作中，首先将预成形管坯 4 放入右固定凹模 2 内，扳动凸轮手柄 6 使左活动凹模 5 右行，从而把管坯夹紧。上模下行时，压平凸模 11 的导头导正管坯，然后由三块组成的环状扩口凸模 7 将管端扩成喇叭口（图 3.5-138a）。上模继续下行，通过楔面作用使扩口凸模沿径向撑开，压平凸模的环状平面将管端喇叭口压平（图 3.5-138b）。上模回程时，在橡皮 10 和拉簧 12 的作用下，使三块扩口凸模复位合拢。扳动凸轮手柄，左活动凹模在拉簧 13 作用下向左复位，从而取出管件。

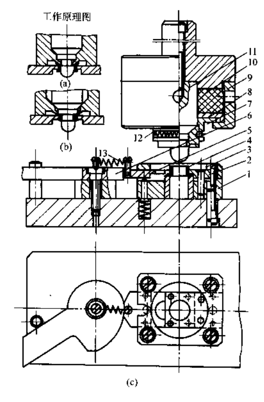


图 3.5-138　扩口压平复合模

1—垫块；2—右固定凹模；3—盖板；4—预成形管坯；
5—左固定凹模；6—凸轮手柄；7—扩口凸模；8—垫板；
9—压紧套；10—橡皮；11—压平凸模；12、13—拉簧

5.3　充液拉深

充液拉深是液压成形（又称液力成形）的主要方法之一，是利用液体（油或水等）代替刚性的凸模（或凹模）直接作用于板坯进行成形的方法，属软模（半模）成形工艺之一，具有柔性成形的特点。与刚性模成形相比，其压力作用均匀、易控制，可成形更复杂的零件，成形极限与成形质量显著提高。

目前充液拉深方法主要是利用软凹模的拉深方法，因此，该方法也称为对向液压拉深。

（1）成形原理与工艺特点

1）成形原理。充液拉深是将板料置于充满液体的凹模兼液压室上，在刚性凸模将板料压入凹模的同时产生反向压力，使板料按凸模拉深成形，成形时液体可进入板料和凹模之间起润滑作用，有时还可利用液体向板料周边施加推力，称为带径向液压的充液拉深。

图 3.5-139 是充液拉深的基本工艺装置。与普通拉深成形装置所不同的是增加了液压室及调节、控制液压室内液体压力的液压控制系统。液压室液体的压力变化因零件形状、材料性能、成形条件及变形特点等诸因素的不同而差异很大。一般来说，对于铝及铝合金板料成形，液压室液体压力大约为 10～30 MPa，低碳钢板为 40～60 MPa，不锈钢甚至达到 70～100 MPa。

根据法兰部位（压边圈与凹模之间）是否使用密封，可将充液拉深分为不使用密封的成形方式和使用密封的成形方式，如图 3.5-140 所示。



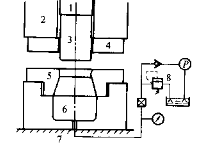
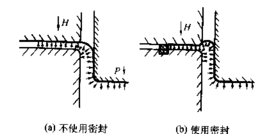


图 3.5-139 充液拉深工艺装置

1—内滑块；2—外滑块；3—凸模；4—压边圈；5—凹模；6—液压室；7—工作台；8—液压控制系统



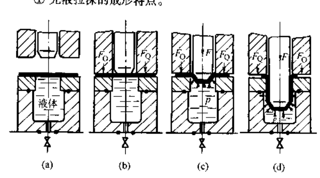
(a) 不使用密封　(b) 使用密封

图 3.5-140 充液拉深成形原理

充液拉深的成形过程如图 3.5-141 所示。首先开泵将液体（油或水等）一直充至凹模而后停泵，在凹模而上放好板料（图 3.5-141a)，施加压边力（图 3.5-141b)，然后凸模开始下行进入凹模，使液压室的液体建立起压力，并将板料紧紧压贴在凸模上（图 3.5-141c)，随着成形的进行直至成形结束（图 3.5-141d)。

2）工艺特点

① 充液拉深的成形特点。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 3.5-141 充液拉深成形过程

a）摩擦保持效果。充液拉深成形时，在液压室内产生液体压力，毛坯受液体压力作用紧紧地贴向凸模，并在毛坯与凸模之间产生很大的摩擦力，从而缓和了板料在凸模圆角附近（危险断而）的径向拉应力，提高了传力区的承载能力。

b）流体润滑效果。如果法兰部位不采取密封的话，液压室内的高压液体从法兰处流出，毛坯在凹模圆角和法兰部位处于一种流体润滑状态，从面减少法兰及凹模口附近的摩擦，使法兰（变形区）的径向拉应力減小，有利于提高成形极限。

c）初始预胀形效果。完全依靠凸模进入凹模的自然增压方式往往造成成形初期的液压不足，此时可采用强制增压方法，就是将凸模固定在毛坯上方一定距离（数毫米或数厘米）后进行压边，启动高压泵向液压室注入液体增压，使毛坯反向胀形，然后凸模进入凹模开始拉深（图 3.5-142)。由于初始胀形的部分在径向受到压缩，可部分地增加凸模圆角附近的料厚，凸模圆角又使成形极限进一步得到提高。

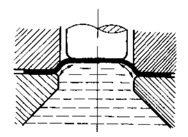


图 3.5-142 初始预胀形效果

② 充液拉深成形的优点

a）大大提高成形极限，减少拉深次数。充液拉深的成形特点，使得凸模圆角附近板料的局部变薄大大缓和，成形极限显著提高，对于圆筒形件，极限拉深比提高 1.3～1.4 倍；对于盒形件，提高了 1.2～1.3 倍。采用充液拉深方法可以一次实现普通拉深需要 2～4 道工序完成的成形。

b）抑制内皱的产生。充液拉深成形时的反向的胀形变形起到了拉深筋的作用，增加了径向拉应力值，使切向压应力相应减小，起皱趋势大大降低。另外，被贴向凸模的部位因“摩擦保持效果”而使凸模圆角处抗破裂能力得到提高，从而可以通过增加压边力成毛坯的直径来消除内皱。

c）提高零件的形状和尺寸精度。充液拉深成形时，坯料易沿反向胀形，使径向拉应力提高。因此，液压值越高，尺寸、形状精度以及定形性越好。

d）提高内、外表而精度。由于反向液压的作用，板料紧紧贴压在凸模上，充液拉深件内表面精度提高；另外，因反向液压形成的反向胀形，成形零件外表而在凹模圆角处不与模具接触，避免划伤、划痕等缺陷，可以获得很好的零件外表面精度。

e）板厚分布均匀。由于“摩擦保持效果”，使得变形易于分散，尤其是凸模圆角处的变形集中得到缓和，板料的局部变薄得以控制，厚度分布均匀。

f）简化模具结构，降低模具成本，缩短模具制造周期。充液拉深成形中，板料是由液压紧紧地贴向凸模的外表面。因此，即使形状比较复杂的零件，也无需采用带底凹模，甚至采用圆形凹模或压边圈也可成形出多角形横断而形状的零件，模具结构大大简化。同时，由于成形极限的提高，拉深次数和模具数量减少，模具成本降低。另外，凸模与板料之间的“摩擦保持效果”和法兰部位的“流体润滑效果”的作用，使得因板料的移动引起的模具表面的磨损、划伤等问题得到解决，模具材料等级可大大降低。

(2) 工艺参数影响

1）加压方式。充液拉深的加压方式有两种：一是自然增压，即只靠凸模压入凹模来建立液压；二是强制增压，就是将凸模固定在毛坯上方一定距高（数毫米或数厘米）后进行压边，启动高压泵向液压室注入液体增压到某一设定值，然后凸模进入凹模开始拉深。自然增压往往会因为初始液压不足引起板料破裂，强制增压能有效地抑制成形初期的破裂。因此，多采用强制增压方式，尤其对于黑色金属，因为黑色金属需要有较强的“摩擦保持效果”和“流体润滑效果”，强制增压能够提供足够的初始液压。

2）压边力。普通拉深的压边力 F_Q 合理范围是 l、m 两条曲线所包围的区域（图 3.5-143)，高于上限 l，会产生破裂失效；低于下限 m，将产生起皱失效。

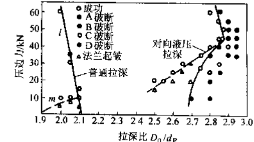


图 3.5-143　普通拉深与充液拉深方法成形极限曲线比较

充液拉深压边力对成形的影响比较复杂，这是因为此时的压边力不仅有普通拉深的压边功能，而且还对液压室的液压建立具有举足轻重的影响。生产中常采用刚性压边方式，一般取刚性压边圈与凹模面之间的间隙约为 1.1 倍的料厚，便可以取得较好的效果。

3）溢流阀设定的压力。溢流阀设定的压力 p 对成形有很大的影响，必须根据零件的成形特点设定成形过程中的最佳压力变化。一般采用分段实时控制方式。近来，通过对成形过程的数值模拟，采用电磁比例溢流阀对成形过程液体压力进行连续控制方式增多。

4）凹模圆角半径。对于凹模圆角半径 r_d，除了像普通拉深时要考虑它对弯曲抗力、角部摩擦力的影响之外，还应考虑到它对液压力的影响。图 3.5-144 是钢板在充液拉深和普通拉深情况下凹模圆角半径 r_d 影响成形极限的实验曲线。

5）凸模圆角半径。图 3.5-145 是 SPCE 钢板采用自然增压方式下凸模圆角半径 r_p 对成形根限影响的实验曲线。

（3）充液拉深模具

充液拉深模具比较简单，这是其一大特点。尤其是凹模，不必制成与凸模一致的形状，加工大为简化，而一般普通拉深的凹模加工比凸模更为复杂。充液拉深凸模需按零件内侧形状、尺寸设计制作，模具各部分尺寸可参见前述加以确定。

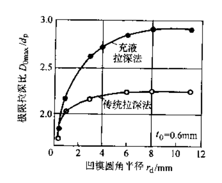


图 3.5-144　凹模圆角半径 r_d 对成形极限的影响

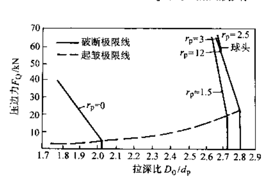


图 3.5-145　凸模圆角半径 r_p 对成形极限的影响

模具材料不一定都选用合金模具钢，采用铸铁也可取得满意的效果。液压室最好采用锻钢或铸钢制作。对于大型复杂零件，凸模可采用树脂，还有采用水泥加金属纤维来制作，使模具成本进一步降低。

因为充液拉深成形具有突出的优点，其应用得到不断地开发。如带径向液压的充液拉深方法、外周带液压的充液反拉深、充液变薄拉深、充液内孔翻边等。

编写：崔令江（哈尔滨工业大学）

第6章　冲压自动化与安全技术

1　冲压生产自动化

高效率的冲压生产，常常需辅以自动化装置。冲压生产自动化可以获得的优越性有：提高生产率，节约人工成本，不需要技术熟练的工人，保证制品质量，提高材料利用率，保证工人安全和减少生产面积及辅助面积。冲压自动化装置的种类较多，包括上料（工件）、送进、取料（工件）及废料排除装置，可根据生产批量的大小、冲压工序的种类、坯料（半成品）的形状和尺寸及冲压设备决定自动化装置的类型。

一般来讲，用自动冲模使个别冲压件实现冲压自动化较为适宜，因为工作量不大。当需要自动冲压的冲压件品种较多时，在通用自动压力机上用普通冲模进行生产，就更合理。冲压件批量很大时，要考虑以专用自动压力机代替通用自动压力机的可能性。大型冲压件的自动化冲压，往往以自动线的形式出现。

冲压自动化装置的种类较多，分类方法也不尽相同。一般包括上料（工件）、送进、取料（工件）和废料（工件）处理等环节。各环节所用装置见表 3.6-1。

表 3.6-1　冲压自动化装置

	原材料			工序件	
	卷料	板料	条料	平件	成形件
上料（工件）	卷料架	贮料、顶料、吸料、释料和移料装置、分离装置		贮件槽	贮件斗
	校平装置、润滑装置				
送进	辊式、夹持式、钩式			传件装置、定向装置、翻转装置、分配装置	
取料（工件）	收料架	取料装置		打件装置、顶件装置、推件装置	
废料排除	切料装置			理件装置、接件装置	
其他	自动保护装置				

1.1　条料、卷料和板料送料装置

冲压送料装置应保证与冲压设备的运动同步，即压力机滑块行程一次，送料一次，且在冲压开始前完成送料。送料距离准确并可调。

条料或卷料的自动送料装置结构种类非常多，常用的形式有钩式送料装置、辊式送料装置和夹持式送料装置。

（1）钩式送料装置

钩式送料装置用于条料和卷料的送料，是送料装置中最简单的一种，适用于料厚大于 0.5 mm，宽度在 100 mm 以下，搭边大于 1.5 mm 的条料和卷料。

钩式送料装置如图 3.6-1 所示。斜楔 2 紧固在上模座 1 上，滑块 3 可在 T 形导板 10 内滑动，滑块的右端用圆柱销 12 连接送料钩 6，它在压簧片 11 的作用下始终与卷料接触。滑块 3 下面通过螺钉连接复位弹簧 5。

钩式送料装置的工作原理：

上模带动斜楔 2 向下移动，斜楔 2 推动滑块 3 向左移动，卷料在送料钩 6 的带动下向左送进，当斜楔的直壁与滑块直壁相互接触时，卷料停止送进，上模继续下行送行冲压。上模回程时，滑块及送料钩在复位弹簧 5 的作用下向右移动，送料钩进入卷料的下一个孔中，送料钩右移时卷料被弹簧片 8 压紧面不能向右移动。

这种结构形式的送料是在上模下降时进行的，因此，卷料的送进必须在冲压前完成。

图 3.6-2 是另一种钩式送料装置。

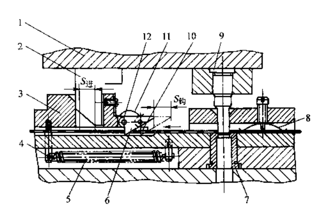


图 3.6-1　钩式送料装置（一）
1—上模座；2—斜楔；3—滑块；4—螺钉；5　复位弹簧；6—送料钩；7—凹模；8—压料簧片；9—凸模；10—T 形导轨板；11—簧片；12—圆柱销

这种结构的送料钩的左右移动，是由斜楔 2 通过滚轮 5 驱动送料滑块面实现的，挡料销 8 防止材料后退以保证送料精度。该送料机构使送料上模上升时进行，因此卷料的送给应在凸模上升离开卷料后进行。

连杆驱动的钩式送料装置如图 3.6-3 所示。

使用钩式送料装置时，开始几件用手工送料，至送料钩能进入料孔时才开始自动送料。为保证送料钩能顺利进入下一个料孔，送料钩行程 $S_{钩}$ 应大于送料行程 $S_{进}$，即



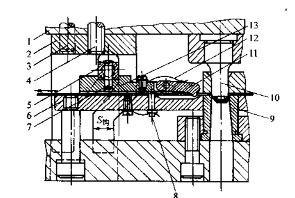


图 3.6-2 钩式送料装置（二）
1—凸模垫板；2—形锁斜楔；3—定位销；4—螺钉；
5—滚轮；6—承料板；7—销钉；8—挡料销；
9—凹模；10—凸模；11—送料钩；12—簧片；13—送料滑块

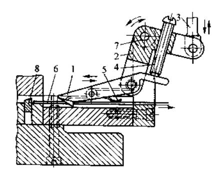


图 3.6-3 连杆驱动的钩式送料装置
1—送料钩；2—摆杆；3—拉杆；
4—螺钉；5—弹簧；6—材料；7—轴；8—止回销

$S_{钩} > S_{送}$

$S_{钩} = S_{送} + S_{附}$

$S_{附} = (0.2 \sim 0.8) S_{送}$，一般 $S_{送}$ 取 1～3 mm。

式中，$S_{附}$ 为附加行程，mm。

钩式送料装置的送料行程一般不大于 75 mm。

钩式送料装置可达到的送料精度如表 3.6-2。

表 3.6-2 钩式送料装置的送料精度 mm

送料进距	<10	10～20	20～30	30～50	50～75
送料精度	±0.15	±0.2	±0.25	±0.3	±0.5

(2) 辊式送料装置

辊式送料装置既可应用于条料和卷料，也可用于板料，是自动送料装置中被广泛采用的一种送料装置。

辊式送料装置中辊轮对材料产生一定的压紧力，辊轮周期性转动时通过摩擦力带动材料运动，达到周期性自动送料的目的。

送料精度是衡量送料装置的一个重要技术指标。影响辊式送料装置送料精度的因素主要有辊轮与材料间的摩擦力、送料速度、送料距离、间歇机构的制造精度、运动机构的惯性等。辊式送料装置的送料精度如表 3.6-3。

表 3.6-3 辊式送料装置的送料精度

送料速度 m/min	行程次数 次/min	送料距离 /mm	送料精度 /mm
15	300～150	50～100	±0.05
25～30	300～150	100～200	±0.1
35～40	200～135	200～300	±0.3～0.4

辊式送料装置的形式分为立辊送料装置和卧辊送料装置两种；卧辊送料装置又有单边辊式送料和双边辊式送料两种结构。

单边辊式送料的辊轮大多数设置在模具送料方向的前方，将材料推入模具工作区域，因此称为推料式。当条料较薄时，为避免材料送进时产生变形也可设计成辊轮位于模具送料方向的后方，材料被拉进模具工作区域，此种形式称为拉料式。单边辊式送料装置由于料尾在脱离辊轮时材料还有一部分没有通过模具中心（推料式），或材料料头部分需拉过模具中心进入辊轮（拉料式），条料有一段没有被利用，对材料利用率有一定影响。为减少对材料利用率的影响，因此单边辊式送料常应用于卷料。

在模具送料方向前后均设置辊轮的称为双边辊式送料，其中一组辊轮推料，另一组辊轮拉料。双边辊式送料材料利用率高于单边辊式送料，常应用于条料，以提高材料利用率。

立辊送料装置和单边卧辊送料装置的结构和调整比双边辊式送料装置简单，也更经济。但若采用推料形式，条料的厚度一般应大于 0.3 mm，以避免条料在送进过程中产生弯曲，影响送料顺利进行。

双边辊式送料装置比立辊和单边卧辊送料装置的通用性好，且能应用于更薄的材料。

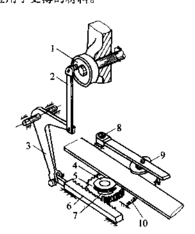


图 3.6-4 立辊送料装置结构示意图
1—偏心轮；2—拉杆；3—杠杆；4、9—辊轮；
5—齿轮；6—齿条；7—超越离合器；8—支点；10—弹簧

图 3.6-4 为立辊送料装置结构示意图。材料通过辊轮 4、9 送进，安装在曲轴端部的可调偏心轮 1，通过拉杆 2 带动摇杆 3 作来回摆动，摇杆的下端与齿条 6 铰接，齿条 6 和齿轮 5 啮合，在齿轮中装有超越离合器 7，辊轮 4 的轴通过超越离合器和齿轮相连，这样，齿条的往复运动由于超越离合器的单向啮合性能，而使辊轮单向旋转，带着材料前进。弹簧 10 的弹簧力通常做成可调，使辊轮对材料的侧面产生一定的压紧力，防止送进时产生打滑。



图3.6-5a是双边辊式送料装置结构示意图。材料从右边送入，超越离合器使辊轮产生间歇送料。左右辊轮由推杆7实现联动。图3.6-5b是单边推式卧辊送料装置结构示意图。该装置的辊轮安装在模具之前，材料受辊轮推动进入模具。在使用时若材料较薄易发生弯曲现象，因此，单边推式卧辊送料装置主要用于材料较厚（0.5 mm），辊轮于模具间距离较小的场合。否则应在辊轮与模具间设置良好的导向装置。为提高材料利用率，常采用双边辊式送料装置。

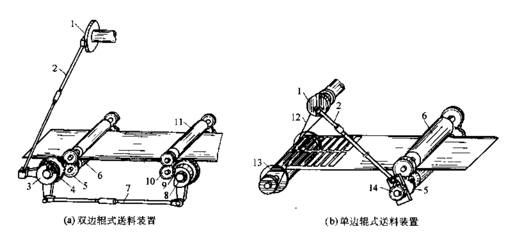


图3.6-5　卧辊送料装置结构示意图

1—偏心盘；2—拉杆；3、8—超越离合器；4、5、9、10—齿轮；6、11—辊轮；7—推杆；12—皮带；13—卷筒；14—棘轮

图3.6-6是单边辊式送料装置结构图。上辊1与下辊4的一端都装有齿轮且相互啮合，因而上辊转动时带动下辊一起转动，使夹在上、下辊之间的材料送进。在压力机滑块上装有悬臂20，滚子21可固定在悬臂20的槽子内的任意位置。当压力机滑块上升时，滚子21带动固定在超越离合器外壳10上的摇臂8转动某一角度，因此外壳10通过异形滚子9带动轴3一起转动一个角度。这样，滑块的上升运动转变为上辊的旋转运动，完成材料送进。

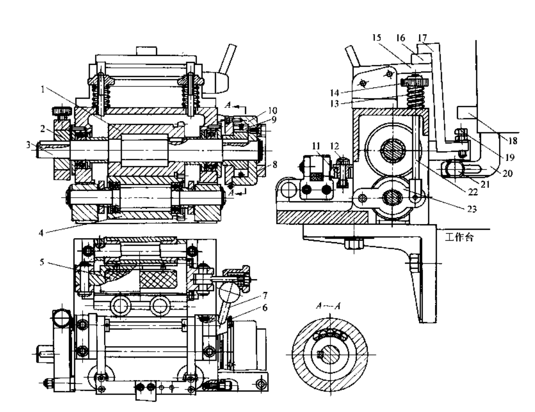


图3.6-6　单边辊式送料装置结构图

1—上辊；2—制动圈；3—轴；4—下辊；5—油毛毡；6—弹簧；7—手柄；8、23—摇臂；9—异形滚子；10—外壳；11—导料轮；12—螺钉；13—弹簧；14—螺母；15、17—杠杆；16—板；18—打块；19—调节螺钉；20—悬臂；21—滚子；22—连杆

当滑块下行时，摇臂 8 及外壳 10 在弹簧 6 的作用下复位。由于超越离合器的单向传动功能，上辊 1 并不转动，使材料保持静止。改变滚子 21 在悬臂 20 槽子内的位置，即改变了摇臂 8 的旋转角度，从而改变了送料距离。

该装置用于带有导正销定位的级进模中时，要求导正销导正时板料应处于自由状态。此动作的实现是在压力机滑块下降时，滑块上的打块 18 接触调节螺钉 19，由件 15、16、17 组成的杠杆被下压，并通过连杆 22 将摇臂 23 下压，下辊 4 是固定在两块摇臂之间的，因而材料被释放，允许导正销对材料作精密定位。

新装入材料时，扳动手柄 7，杠杆系统产生同样动作，使下辊移位松开。材料装入辊子后由螺帽 14 调整辊子对材料的压紧力。一般压紧力调整到以手拉不动材料为宜。

导料轮 11 的位置可以自由调节以适应不同宽度的材料。

1）冲压与送料机构的配合。当模具开始冲压时，送料机构应已完成送料动作，材料停止运动等待冲压。模具完成冲压，上模上行到一定高度，凸模完全脱离凹模和材料后，送料机构开始送进。

图 3.6-7 是压力机滑块行程位置与材料进给之间的近似关系。压力机曲轴从 0°回转到 180°时，压力机滑块下降，从上极点到下极点，曲轴 180°回转到 360°时，滑块上升回到原来上极点位置，S_1 即为滑块的行程。

材料的进给应在 F_4 这段时间内，此时滑块在上半行程（S_2）内运动，不影响材料的进给；冲压工作是在下半行程（S_3）内进行的，因此在 F_1 这段时间内，辊轮应停止转动。在 F_3 这一时间内应将冲压完成的工件与废料取出模具。

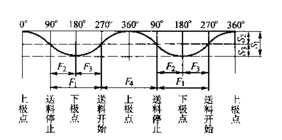


图 3.6-7 滑块行程与材料进给之间的近似关系

2）辊轮设计。送料过程中，辊轮直接与材料接触，要求其表面应具有较好的耐磨性及较高的尺寸与形状精度。常选用 45 钢制造，热处理后硬度 45～48HRC。

辊轮结构形式如图 3.6-8。辊轮直径 $d \leqslant 100$ mm 时，常采用实心辊轮，辊轮直径 $d > 100$ mm 时宜采用空心辊轮。

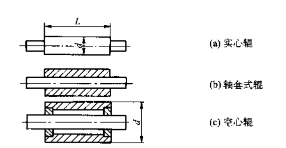


图 3.6-8 辊轮结构

辊轮直径尺寸按式（3.6-1）计算：

$$d_1 = 360 S_2 / \pi\alpha \qquad (3.6\text{-}1)$$

式中，d_1 为下辊直径，mm；S_2 为送料距离，mm；α 为下辊转角，(°)，一般 $\alpha < 100°$。

通常，取上、下辊直径相等。若不相等须满足下列关系：

$$d_1 / d_2 = n_2 / n_1 = z_1 / z_2$$

式中，d_2 为上辊直径，mm；n_1 为下辊转速，r/min；n_2 为上辊转速，r/min；z_1 为下辊传动齿轮齿数；z_2 为上辊传动齿轮齿数。

辊轮长度一般取 $L = B +$（10～20）mm

式中，L 为辊轮长度，mm；B 为材料宽度，mm。

3）驱动机构。辊式送料装置的驱动方式有压力机传动和单独传动两类。压力机传动又有压力机曲轴驱动和压力机滑块驱动两种。常见的驱动机构有曲柄摇杆传动、拉杆杠杆传动、斜楔传动、齿轮齿条传动、链条传动及气动液压传动等。压力机传动与压力机的行程容易协调，广泛应用在中、小型压力机上，其中铰链四杆机构传动结构简单可靠，在生产中使用较多。几种传动机构如图 3.6-9～图 3.6-12 所示。

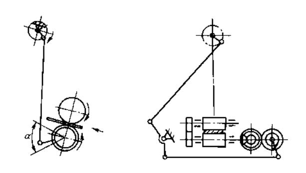


图 3.6-9 曲柄摇杆传动　　图 3.6-10 拉杆杠杆传动

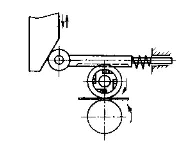


图 3.6-11 斜楔传动

4）压紧装置。为保证送料精度，上、下辊对材料应有一定的压紧力，以保证辊轮与材料之间有足够的摩擦力。图 3.6-13 是压紧装置示意图。

上、下辊与材料之间的压紧力可按式（3.6-2）计算：

$$p = 4.18\sqrt{\frac{FE}{RB}} \leqslant p_c \qquad (3.6\text{-}2)$$



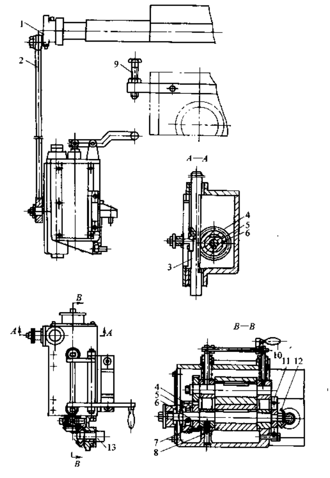


图 3.6-12 齿轮齿条传动

1—偏心；2—拉杆；3—齿条；4、7—齿轮；5—超越离合器；6—辊轮芯轴；8—辊轮；9—可调螺钉；10—抬辊杠杆；11—制动器；12—锥齿轮；13—传动轴

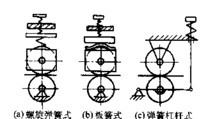


图 3.6-13 压紧装置

式中，p 为辊轮与材料间的接触压力，Pa；F 为辊轮对材料的总作用力，N；E 为材料的弹性模量，MPa；R 为辊轮半径，mm；B 为材料宽度，mm；p_c 为许用接触压力，Pa，通常 $p_c = 0.5\sigma_s$。σ_s 为材料的屈服强度。

5）抬辊装置。当辊式送料装置的送料精度不能满足要求时，应在模具上加装导正销。模具冲压前，要将上辊稍稍上抬以释放材料，利用模具上的导正销将材料精确定位。这种机构称为抬辊机构。常见的抬辊机构有撞杆式、气动式、偏心式、斜楔式和凸轮式，抬辊机构示意图见图3.6-14。

表 3.6-4 所示是几种可调式抬辊机构，可调整滑块行程与释料时间的关系，用于需要较长工作行程的拉深模等。

6）送料距离调节装置。送料距离的调节是通过改变辊轮的转角大小来实现的。辊轮和摇杆刚性联接在同一轴上，

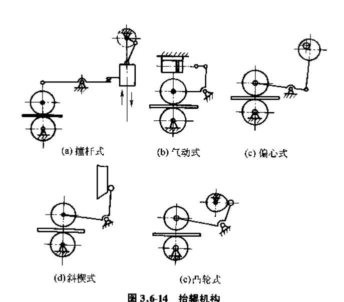


图 3.6-14 抬辊机构

送料时其转角相同。压力机曲轴端部通过偏心块与拉杆、摇杆联接，改变偏心块偏心便可改变摆角，从而达到改变送料距离的目的。

送料距离按式（3.6-3）计算：

$$S_2 = (\pi d/360)\alpha \tag{3.6-3}$$

表 3.6-4　可调抬辊机构形式

型　式	简　　图	说　　明
旁滑式	1—凸轮；2—滑轮；3—杠杆	在压力机滑块上装板状凸轮 1，通过滑轮 2 与杠杆 3 使辊轮提升。可以使滑块下行到下极点前较大距离时即行释料。适用于工作行程大的深拉深，以及必须较早地用导正销导正条料的冲压加工
偏心式	1—曲轴；2—连杆；3—杠杆	在压力机曲轴 1 端部装偏心连杆 2，通过杠杆 3 提升辊轮。其特点是随着辊子提升，模具上的导正销对条料导正后，辊子重又压下，将条料固定，适用于连续拉深
凸轮式	1—曲轴；2—链轮；3—链条；4—凸轮；5—杠杆	在压力机曲轴 1 端部安装链轮 2，通过链轮与链条 3 以及锥齿轮使提升凸轮 4 回转，再通过杠杆 5 使辊轮提升 可以调整链轮在曲轴上的安装位置来保证滑块行程与提升时间的关系 辊轮提升后，用导正销导正条料，导正后又可以使辊轮下压，固定条料，适用于连续拉深
气动式	1—气缸；2—杠杆	由气缸 1 推动杠杆 2 并使辊轮提升。压力机滑块与辊轮提升的同步是由装在滑块上的限位开关或由装在压力机机身上的回转式限位开关来实现。由于气缸的动作随空气压力的变化而变化，动作不及机械式的敏感，因此对于高速冲压是不合适的

式中，S_2 为送料距离，mm；d 为辊轮直径，mm；α 为辊轮转角，$\alpha \leqslant 75° \sim 100°$。

图 3.6-15 所示为偏心块偏心距 e 和辊轮转角 α 的关系，图 3.6-16 为偏心调节装置。

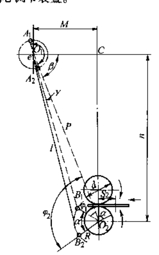


图 3.6-15　偏心距 e 和转角 α 的关系

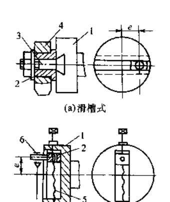


图 3.6-16　偏心调节装置

1—偏心盘；2—调节滑块；3—锁紧螺钉；4—连杆；5—调节螺杆；6—连杆轴

7）间歇运动机构　间歇运动机构的作用是将曲轴或滑块的连续运动转化为辊轮的间歇转动，辊式送料装置中常使用棘轮机构、超越离合器和蜗杆凸轮机构等。棘轮机构缺点较多，在新设计中已较少应用。

① 超越离合器。分为普通滚柱式和异形滚子式两类。



图 3.6-17 为普通滚柱式超越离合器。外轮 1 沿逆时针方向转动时，带动滚柱 2 楔入外轮与星轮 4 的槽内，就推动星轮及用键与它相联的轴转动；当外轮顺时针方向转动时，滚柱脱离楔紧状态，星轮及轴保持不动。

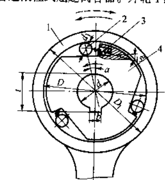


图 3.6-17　普通滚柱式超越离合器
1—外轮；2—滚柱；3—弹簧；4—星轮

滚柱脱离楔紧时，为防止外轮与滚柱间相对滑动带动星轮转动，一般星轮轴上还须装有制动器，或者反向装上另一个超越离合器。

表 3.6-5 和表 3.6-6 列出 3 滚柱和 5 滚柱普通超越离合器的技术参数。

异形滚子的断面如图 3.6-18 所示。异形滚子式超越离合器由于滚子数目很多，一般有 20 ~ 50 只，因此降低了接触应力，在传递同样的扭矩时，其径向尺寸只有普通超越离合器的一半，离合器尺寸和惯性的减小就更适于高速冲压。异形滚子的曲率半径比普通滚柱大，摩擦力小，因此磨损少，寿命长，而且异形滚子本身可达很高的精度，可以制成高精度的送料装置。

表 3.6-5　3 滚柱超越离合器技术参数

mm

外轮内径 D	外轮外径 D_1	滚柱直径 d_1	滚柱长度 L	星轮毂孔径 d	星轮毂键宽 b	外轮键宽 b_1	外轮键突出量 K	公称转矩 M/N·m
32	45	4	8	10	3	3	1.2	2.35
				12	4			
				14				
40	55	5	10	14	5	4	1.8	4.6
				16				
			12	18		5	2.3	8.3
50	70	6		16				
				18	6			
				20				
65	85	8	14	16	5			17.2
				20	6			
				25	8			
80	105	10	18	20	6	6	2.6	33.3
				25	8			
				30				
				35	10			
100	130	13	24	25	8	8	3.2	73
				30				
				35	10			
				40	12			

表 3.6-6　5 滚柱超越离合器技术参数

mm

外轮内径 D	外轮外径 D_1	滚柱直径 d_1	滚柱长度 L	星轮毂孔径 d	星轮毂键宽 b	外轮键宽 b_1	外轮键突出量 K	公称转矩 M/N·m
80	105	10	18	25	8	6	2.6	55
				30				
				35	10			

续表 3.6-6

外轮内径 D	外轮外径 D_1	滚柱直径 d_1	滚柱长度 L	星轮毂孔径 d	星轮毂键宽 b	外轮键宽 b_1	外轮键突出量 K	公称转矩 M/N·m
100	130	13	24	30	8	8	3.2	120
				35	10			
				40	12			
125	160	16	28	35	10			216
				40	12			
				45	14			
				50	16			
160	200	20	32	70	20	12	3.8	392
200	250	25	40	90	24			770

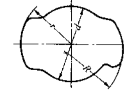
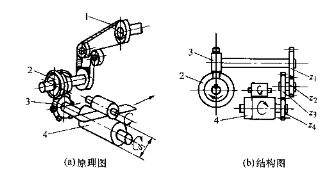


图 3.6-18　异形滚子

异形滚子式超越离合器可按零件的要求设计成多种规格的送料长度、材料宽度和厚度。在一般情况下，送料进距精度可达 ±0.05 mm（用导正销时更高），送料速度最大可达 50 m/min，冲压行程次数应小于 800 次/min，材料厚度应介于 0.05～8 mm 之间。

② 蜗杆凸轮机构。图 3.6-19 为蜗杆凸轮机构。该机构是由压力机曲柄驱动的，曲柄通过齿轮将运动传给蜗杆凸轮 2，使滚子作精确的间歇转动。在任何瞬时从动轴上的滚子（滚子上装有滚针轴承）中总有一对与蜗杆凸轮保持无间隙的接触。蜗杆凸轮的截面呈梯形，因此滚子与蜗杆凸轮容易达到过盈配合，消除间隙。



(a) 原理图　(b) 结构图

图 3.6-19　蜗杆凸轮机构

1—带轮；2—蜗杆凸轮；3—辊子；4—下辊轴；

z_1、z_2、z_3、z_4—可更换齿轮

送料进距的改变是通过更换齿轮改变传动比实现的。

滚子的数量应尽量做到 6 个以上，但一般不宜超过 12 个，以免制造困难。

采用蜗杆凸轮机构作进料装置的优点如下。

a) 送料机构的加速度曲线是正弦曲线或经修正的正弦曲线，在送料开始和结束时，冲击和振动很小，提高了送料的稳定性和送料精度。

b) 相邻的两滚子以过盈配合紧紧夹住蜗杆凸轮，因此当螺纹升角过渡到零时，从动轴立即停止转动，没有惯性，可以不用制动器。

c) 一次进给距离取决于齿轮传动比，只需简单地更换齿轮，送料长度即可在 1:10 的范围内几乎无级地调节。

d) 因为是无间隙的高精度传动，所以送料精度比普通送料装置提高约 30%～40%。

采用蜗杆凸轮机构的辊式送料装置，其送料长度、材料宽度应视工件的需要而定。一般材料厚度为 0.05～8 mm；送料速度最高时可达 107 m/min，一般≤70 m/min；冲压次数最高时达 2 000 次/min，一般可达 700 次/min。送料精度在采用高精度凸轮时可达 ±0.02 mm，在采用较精密凸轮时可达 ±0.05 mm。送料长度可设计在 10～2 500 mm 之间；材料宽度可设计在 10～1 300 mm 之间。

8) 制动装置。在送料过程中，由于辊轮、坯料及传动系统的惯性，导致送料精度下降，特别是当辊轮直径尺寸较大且送料速度又高时。为克服辊轮等零件惯性的影响，有时在辊轮轴端部设置制动器。

制动器的结构形式多为闸瓦式，如图 3.6-20 所示，其结构简单，容易加工装配，缺点是长期处于制动状态，摩擦损失较大。其他的制动器有带式和气动式。

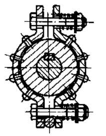


图 3.6-20　闸瓦式制动器

(3) 夹持式送料装置

1) 夹持式送料装置的特点。在条料和卷料的自动送料装置中，夹持式送料装置是被广泛使用的另一种送料装置。它的动作原理如图 3.6-21 所示。

与辊式送料装置相比，夹持式送料装置有如下优点：

① 结构简单，易于安装，易于作进给距离的微调；

② 材料厚度的变化和材料表面的灰尘油污对送料的影响小；

③ 材料进进时的张力大。

缺点有：

① 不适用于较高速度的送料；

② 容易划伤材料表面；
③ 用导正销修正步距困难。

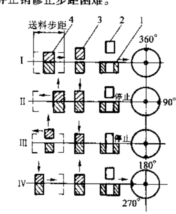


图 3.6-21 夹持式送料装置动作原理
1—凹模；2—凸模；3—止退夹持器；4—送料夹持器

与辊式送料装置类似，夹持式送料装置也有单边送料（推料式或拉料式）和双边送料（同时推料拉料）两种。

夹持式送料装置主要有夹刃式、夹滚式、偏心轮式和气压夹持式等形式。

对于薄料用滚柱夹滚式或偏心轮式为宜，对于厚料用斜刃夹持式为宜。

表 3.6-7 是夹持式送料装置的平均特性。

表 3.6-7 夹持式送料装置的平均特性

夹持方式	料宽 /mm	料厚 /mm	步距 /mm	每分钟送进次数	最大送料速度 /m·min⁻¹	精度/mm
机械夹持	≈500	≈6	≈500	≈200	25	可达 ±0.05 ~ ±0.15
气压夹持	≈500	≈3	≈500	≈250	10	可达 ±0.05 ~ ±0.1

2）送料装置典型结构

① 斜刃夹持式送料装置。斜刃夹持式送料装置有表面夹刃和侧面夹刃两种。表面夹刃会夹伤材料表面，故一般用在较硬材料或冲压件表面要求不高的场合。侧面夹刃用在方形、扁形和圆形材料的送进上。表面夹刃和侧面夹刃也可以组合使用，送料侧使用侧面夹刃，出料侧使用表面夹刃。表 3.6-8 为斜刃夹持式送料装置。表 3.6-9 是斜刃夹持式送料装置的性能参数。表 3.6-10 是斜刃形状。

表 3.6-8 斜刃夹持式送料装置

形式		结构特点	工作原理	优缺点	送料精度/mm
夹刃式	表面夹刃	1—送料夹持器 2—止退夹持器	送料时，送料夹持器夹紧材料，止退夹持器松开，送料夹持器带动材料向前送进完成送料。退回时，送料夹持器松开，止退夹持器夹紧，防止材料退回	适应不同厚度的材料。送料时易夹伤材料表面，一般用于较硬材料或零件表面要求不高时	±0.15
	侧面夹刃	60°		用于厚度较大的材料，不夹伤材料表面	
	表面与侧面夹刃			表面夹刃夹住已冲材料表面送料，侧面夹刃夹住未冲材料侧面止退。送料精度高	

表 3.6-9 斜刃夹持式送料装置的性能参数

材料	料宽/mm	料厚/mm	送进距离/mm	滑块行程次数 /次·min⁻¹	送料速度 /mm·s⁻¹
条料、带料	10 ~ 150	0.5 ~ 5	10 ~ 75	≤200	≤250
卷料	10 ~ 100	0.3 ~ 1			

表 3.6-10　斜刃形状

序号	简图			60°		
1	斜刃形状特征	方体	凸轮	菱形	斧形	棘爪
2	应用范围	料宽 > 20 mm	可以侧面也可用于表面夹料	侧面夹料，不适于薄料	适用表面夹料，料宽任意	适用窄带薄料的表面夹持
3	结构特点	夹刃前倾斜角 12° ~ 15°	歪头凸轮单向摆头	夹刃尖角 < 60°	夹刃尖角 30°	夹刃尖角 30°
4	推荐斜刃材料	碳素工具钢淬硬 62HRC	高碳钢或合金结构钢淬硬	T7A、T10 淬硬	建议夹刃用硬质合金	合金工具钢或用硬质合金刃尖
5	备注		少用	一般多为多组夹刃组合	常用	常用

图 3.6-22 至图 3.6-25 为夹刃式送料装置结构图。

② 夹滚夹持式送料装置。夹滚夹持式送料装置是利用滚珠或滚柱在斜面上的移动来对材料实行夹紧和放松，通过斜楔摆杆、气缸等传动实现间歇送料。表 3.6-11 为夹滚式送料装置的结构。

图 3.6-26 为滚柱夹持式送料装置，该装置用左、右两个滚柱夹持材料，右侧为送料夹持器，可由滚轮 2 驱动而左右移动；左侧为止通夹持器，两夹持器结构相同。当压力机滑块或模具上的斜楔 1 随滑块下降时，与滚轮 2 接触，推动送料夹持器 9 向左移动，此时，由于材料对滚柱的摩擦力，滚柱向右移动，使送料夹持器对材料失去夹持作用，同样的原因左侧止退夹持部分由于斜面作用使滚柱夹紧材料，防止材料的后退。当压力机滑块回程时，斜楔随之上升，在弹簧 8 的作用下，送料夹持器向右移动，此时在夹持器斜面和弹簧的作用下，送料夹持器夹紧材料，送进一个步距，而止通夹持器则将材料放松。这样每一次往复运动，间歇完成一次送料。

第一次将材料装入送料装置，或是冲压过程中发生故障需要将材料退出时，可以用手拨动手柄 10 使滚柱保持架右移，增大滚柱间距离，材料即可自由移动。

滚柱对材料压紧力的大小，通过调节弹簧 7 的松紧实现。

滚柱夹持式送料装置的设计，除考虑材料的宽度外，还应对材料厚度有一定的调节量，调节量按式（3.6-4）计算（参见图 3.6-27）：

$$S=\frac{t_2-t_1}{2\tan\alpha} \tag{3.6-4}$$

式中，S 为调节量，mm；t_1 为材料最小厚度，mm；t_2 为材料最大厚度，mm；α 为 11° ~ 12°。

滚柱直径 d 由式（3.6-5）计算：

$$d=\frac{b_0+2S_1\tan\alpha-t_1}{1+\frac{1}{\cos\alpha}} \tag{3.6-5}$$

式中，S_1 为外座内小端至滚柱中心距，mm；b_0 为外座内框小端尺寸，mm。

③ 偏心轮夹持式送料装置。偏心轮夹持式送料装置如图 3.6-28 所示。斜楔下降时，通过滚轮 2 推动送料夹持器 6 向左移动，此时偏心轮 3 受材料表面摩擦同时而绕轴 4 逆时针方向转动，使上下两轮对材料不起夹持作用，同时左边的夹持器 7 上的偏心轮将材料夹紧不使之后退。冲压回程时在弹簧 9 作用下送料夹持器 6 向右移动，此时偏心轮 3 夹紧材料送进，而止退夹持器则由于材料向右移动，材料与偏心轮 7 之间的摩擦力使偏心轮 7 逆时针方向旋转面松开材料。

两个夹持器上的偏心轮都由于弹簧 8 的作用，保持有一定的扭矩。偏心轮安装在摆杆 5 上，摆杆绕轴心 Z 点摆动，以适应不同厚度的材料。

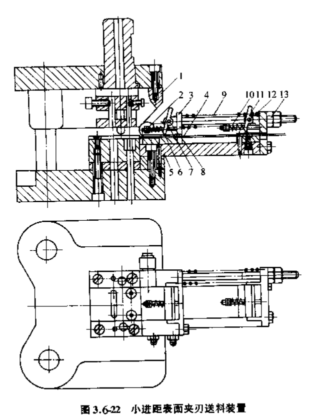


图 3.6-22　小进距表面夹刃送料装置

1—斜楔；2—滚轮；3—送料夹座；4—材料；5—滑座；6、9、10—弹簧；7、11—夹刃；8、12—圆销；13—螺母



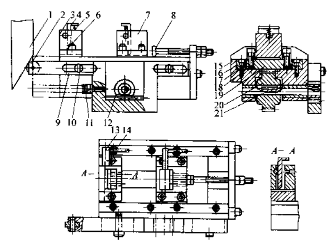


图 3.6-23　大进距表面夹刃送料装置

1—斜楔；2—滚轮；3—止退夹座；4—夹刃；5、11—弹簧；6—圆销；7—送料夹座；8—调节螺钉；9—齿条架；10—导向钉；12—小齿轮；13—偏心轴；14—扳手；15—底座；16—导轨；17—滚珠；18—隔板；19—滑板；20—大齿轮；21—轴

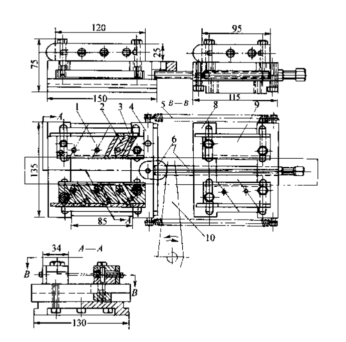


图 3.6-24　侧面夹刃送料装置

1—送料夹刃架；2—夹刃；3、5—弹簧；4—送料夹座；6—凸块；7—螺母螺钉；8—止退夹座；9—止退刃座；10—摆杆

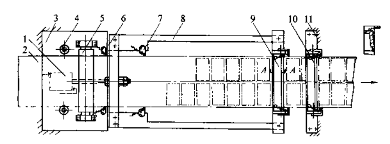


图 3.6-25　侧面表面夹刃送料装置

1—气缸；2—条料；3—底板；4—导料滚轮；5—压料器；6—侧面止退夹刃；7—侧面送料夹刃；8—移动架；9—表面送料长夹刃；10—表面止退长夹刃；11—底板

表 3.6-11　夹滚式送料装置的结构

型　式	结　　构	特　　点	送料精度/mm
一个滚柱和一个夹板	α	结构简单，能减少材料夹伤，材料的局部弯曲对夹紧性能的影响小 α 一般取 11°～12°	
双滚柱		夹料比较均匀，材料的局部弯曲现象不影响夹紧性能，对软材料会有夹伤	
一个滚柱和双夹板		不会夹伤材料，材料的局部弯曲对夹紧性能有不良影响	±0.01～0.03
双滚柱双夹板		夹料均匀，不会夹伤材料，材料的局部弯曲对夹紧性能有不良影响	
偏心轮和轮子	1　2　3 1—送料夹持器；2—偏心轮；3—止退夹持器	用偏心轮代替滚柱	

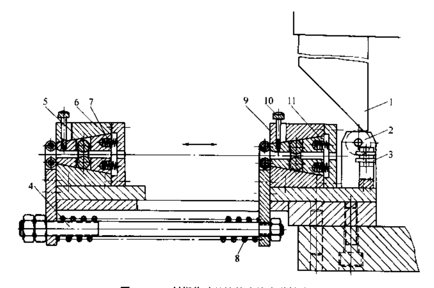


图 3.6-26　斜楔传动的滚柱夹持式送料装置
1—斜楔；2—滚轮；3—导料轮；4—螺杆；5—滚柱；6—止退夹持器；
7、8—弹簧；9—送料夹持器；10—手柄；11—滚柱保持架



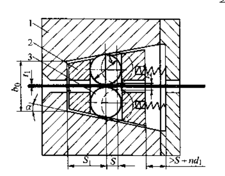


图 3.6-27 滚柱计算简图

1—外座；2—保持架；3—滚柱；d_1—弹簧直径；n—弹簧圈数

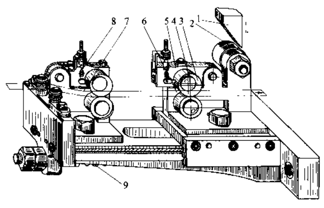


图 3.6-28 偏心轮夹持式送料装置

1—斜楔；2—滚轮；3—偏心轮；4—轴；
5—摆杆；6—送料夹持器；7—定料夹持器；8、9—弹簧

用偏心轮夹持，为防止打滑必须使偏心轮能自锁，一般取$\frac{e}{R}=1.5$，e 为偏心距，R 为偏心轮半径。

在$\frac{e}{R}>1.5$ 时偏心距直线转到水平线以下 β 角时（图 3.6-29）才开始产生自锁性能。产生自锁的条件是 $\alpha<8°30'$，即最小角为

$$\beta_{\min}=81°30'-\arcsin\frac{0.15R}{e}$$

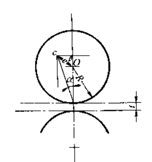


图 3.6-29 偏心夹持自锁条件

④ 夹钳式送料装置。图 3.6-30 为夹钳式送料装置的工作原理图，送料夹钳在往复运动中完成送料，止退夹钳的作用是防止送料夹钳退回时材料后退。夹钳式送料装置的往复动作有机械驱动式（图 3.6-31）、液压传动式（图 3.6-32）和气动式（图 3.6-33）。

机械驱动式由压力机曲轴驱动，气动式和液压传动为独立驱动，但控制部分应与压力机滑块的上下运动保持同步。

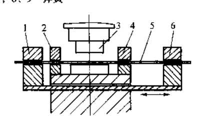


图 3.6-30 夹钳式送料装置工作原理图

1、6—送料夹钳；2、4—止退夹钳；3—模具；5—材料

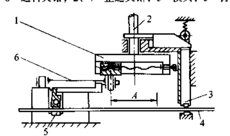


图 3.6-31 机械驱动夹钳式送料装置

1—偏心盘；2—传动轴；3—止退夹钳；4—材料；
5—送料夹钳；6—连杆；A—送料距离

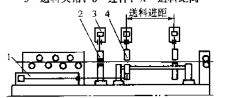


图 3.6-32 液压传动夹钳式送料装置

1—送料液压缸；2—止退夹钳；
3—夹紧液压缸；4—送料夹钳



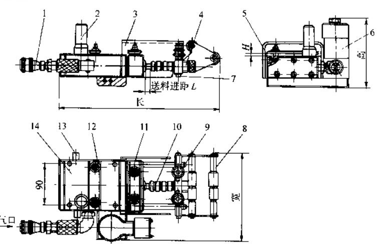


图 3.6-33 AF 系列气动夹钳式送料装置

1—气嘴接头；2—导向阀；3—安全罩；4—调节螺钉；5—调速阀；6—电磁阀；7—锁紧螺钉；8—托料架；9—导轮；10—调节圈；11—移动夹紧装置；12—固定夹紧装置；13—消声器；14—阀体

气动送料装置以压缩空气为驱动力，压力机滑块下降时，由在滑块上固定的撞块撞击送料装置的导向阀，气动送料装置的主气缸推动固定夹紧机构的气缸和送料机构的气缸，使它们完成送料和定位工作。气动送料装置灵巧轻便，通用性很强。其送料长度和材料厚度均可调整，所以不但适用于大批量生产，也适用于多品种、小批量的冲压生产。

气动送料装置有推式和拉式两种。因材料性能、厚度、宽度和送料长度的不同，所以有很多规格。国外 AF 系列气动送料装置规格列于表 3.6-12 中，推式、拉式均有。表 3.6-13 是 AF 系列气动送料装置的送料长度与滑块行程次数(次/min)的关系。在确定送料长度后，应根据该表选择行程次数。

表 3.6-14 是国外 P/A 型气动送料系列规格表，它和 AF 型的两个不同点是：a）帮助用户选好了材料宽度和送料长度；b）由于上述两个可变因素均成定数，最大送料速度也就定了。因此送料装置的结构尺寸比较紧凑，精密度高且便于互换，适用于大量生产。

表 3.6-12 AF 型气动送料装置的技术规格（小型）

气动送料装置型号	AF-1C	AF-2C	AF-3C	AF-4D	AF-5D	AF-6D	AF-6S
最大送料宽度/mm	38	65	80	100	150	200	250
最大送料宽度时材料厚度/mm	0.8	1.0	1.2	1.5	1.6	1.5	1.2
所夹材料的最大厚度/mm	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.0	2.0
所夹材料的最小厚度/mm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
最大送料长度/mm	50	80	80	130	150	200	200
最大送料长度时行程次数/次·min^{-1}	200	160	150	100	80	70	60
最大空气消耗量①（气压为 0.4 MPa）/L·min^{-1}	27	47	70	70	100	100	100
最大材料厚度时材料宽度①/mm	38	65	80	100	120	150	150
固定夹板的夹紧力①（气压为 0.4 MPa）/N	160	215	215	375	630	630	630
活动夹板的夹紧力①（气压为 0.4 MPa）/N	215	340	395	675	1 060	1 200	1 200
夹板拉力①（气压为 0.4 MPa）/N	88	130	200	200	245	245	245
送料装置的净重/kg	6.5	8.5	10	16	38	46	51
送料装置的外形尺寸 *L*/mm × *B*/mm	279 × 150	335 × 168	362 × 184	483 × 220	544 × 314	648 × 376	648 × 404
送料装置高度 *H*/mm	98	98	105	105	120	120	120
最小保证气压/MPa	0.4 ~ 0.5						
送料装置的一般精度/mm	± 0.025						

① 表示有条件的规格。

表 3.6-13　AF 系列气动送料装置的送料长度与行程次数的关系

气动送料装置	送料长度/mm																大型气动送料装置
	10	20	30	40	50	60	70	80	100	130	150	200	300	400	500	600	
型号	中小型滑块行程次数/次·min^{-1}												大型/次·min^{-1}				型号
AF-1C	250	235	220	210	200								45				AF-80
AF-2C	240	225	210	195	185	175	167	160					40				AF-200
AF-3C	200	190	180	170	164	158	153	150					50				AF-300
AF-4D	180	167	156	146	136	128	120	113	108	100			45	40			AF-400
AF-5D	170	156	143	130	120	112	105	100	93	86	80		50	42	35		AF-500
AF-6D	155	137	125	115	106	100	95	90	82	76	72	70	50	42	35	30	AF-600
AF-6S	90	85	80	77	74	72	70	68	64	62	60	60	40	34	29	25	AF-800

表 3.6-14　P/A 型系列气动送料装置技术规格　mm

送料装置型号	最大材料宽度	最大送料长度	适用材料厚度	最大送料次数/次·min^{-1}	压缩空气压力/MPa	送料装置精度	送料装置外形长度	送料装置外形宽度	送料装置的主气缸厚度（外形厚度）
AX2	38	50	0.1～1.2	280	0.5	±0.025	238.3	98.6	34.8 (90.2)
AX4		101	0.1～1.1	220			339.9	101.6	
AX6		152	0.1～1.0	180			441.5		
CX3	76	76	0.1～1.7	220	0.5	±0.025	309.4	161.8	46 (117.1)
CX6		152	0.1～1.6	160			461.8		
CX9		228	0.1～1.5	110			614.2		
CX12		304	0.1～1.4	95			766.6		
DX4	101	101	0.1～1.8	195	0.5	±0.025	371.1	193.6	46 (117.1)
DX6		152	0.1～1.7	145			472.7		
DX12		304	0.1～1.6	85			766.6		
FX4	152	101	0.1～2.1	160	0.5	±0.025	438		52.4 (124.3)
FX6		152	0.1～2.0	140			489		
FX9		228	0.1～1.9	110			641.4		
FX12		304	0.1～1.8	80			793.8		

方柱形气动送料装置结构尺寸更小，送料宽度、长度更大。在同为 0.5 MPa 的压缩空气压力情况下，其固定夹板、移动夹板的夹紧力更大，因而更能保证冲压零件尺寸公差的稳定性。表 3.6-15 是方柱形系列气动送料装置的技术规格。

表 3.6-15　方柱形系列气动送料装置技术规格

气动送料装置型号	AF-2C	AF-3C	AF-4C	AF-5C	AF-6C	AF-7C	AF-8C
最大送料宽度/mm	76	80	100	150	200	250	300
最大送料长度/mm	70	80	125	150	200	250	300
最大送料厚度/mm	0.8	1.2	1.5	2	2	2.5	2.5
压缩空气压力/MPa	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
最大送料次数/次·min^{-1}	200	180	130	100	80	55	50

续表 3.6-15

气动送料装置型号	AF-2C	AF-3C	AF-4C	AF-5C	AF-6C	AF-7C	AF-8C
固定夹板夹紧力/N	300	450	600	850	850	1 200	1 200
移动夹板夹紧力/N	530	680	850	1 550	1 780	2 000	2 170
夹板引张力/N	165	195	255	410	410	670	740
空气消耗量/L·min^{-1}	32	42	53	105	105	132	152
送料装置质量（包括工具）/kg	9.6	12.8	19.6	38.4	52.4	80	95
送料装置外形尺寸 L/mm × B/mm	338×110	362×125	480×160	545×220	650×270	795×336	845×390

注：方柱形气动送料装置还有 AF-1C，AF-9C，AF-10C，AF-11C，本表未列出。

气动送料装置的最大特点，是送料进距精度较高且稳定可靠，一致性好。对于带导正销的高精度级进模，可使其送料浮动，在此期间，保证导正销的导入，从而可使经导正后的送料重复精度高达 ±0.003 mm。对于一般无导正销的级进模，依靠送料装置本身的精度，也能获得高于 ±0.02 mm 的送料进距精度。

在使用气动送料装置时，压缩空气必须经过滤水器、调压器、油雾器的过滤，滤掉空气中的水分和杂质，并使气压调整到规定的范围，还需喷入一定数量的油雾，以保证零件润滑，延长密封圈的使用寿命。

由于气动送料装置采用压差式气动原理，送料动作灵活，反应迅速，且调整方便。但也因此有点噪声。为减小冲压时气体的噪声，在本装置阀体上专门安装有消音装置。

(4) 卷料自动排样送料装置

卷料排样通常有横向直排、横向斜排和参差排样三种形式（图 3.6-34）。为满足冲压工艺的排样要求，并使模具结构简单，卷料的送料装置也具有横向直排、横向斜排和参差排样三种型式。

1）横向直排送料装置。图 3.6-35 所示为横向直排送料装置，这种装置能实现图3.6-34a所示工艺排样。

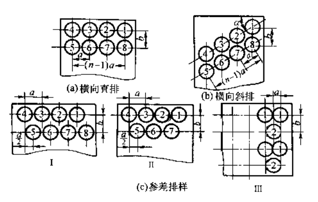


图 3.6-34　排样方式

Ⅰ—上下两排冲孔数相等；Ⅱ—上下两排冲孔数不等；Ⅲ—双冲头参差排样

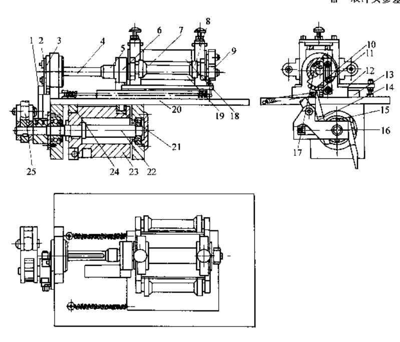


图 3.6-35　横向直排送料装置

1、21—滚子；2—纵向送料距调节片；3、6—超越离合器；4—小轴；5—联轴器；7—压料棒；8—导料圈；9—直齿轮；10—定位块；11—撞块；12—拖板；13—拖板座；14—拨杆；15—棘轮；16—棘爪；17—星轮；18—上辊筒；19—下辊筒；20—台面板；21—凸轮轴；23—圆柱凸轮；24—制动圈；25—连杆

2）横向斜排送料装置。图 3.6-36 所示为横向斜排送料装置，它能完成图 3.6-34b 所示排样。

纵向送料动作的实现，由压力机曲轴端的偏心盘通过拉杆带动棘轮 1，棘轮 1 经转动一对直齿轮 4，经轴 8 传动槽轮机构 9，然后经轴 10、锥齿轮 11 带动滚轮转动，完成纵向送料。

横向送料动作，由棘轮 1 转动 -对锥齿轮 3，带动横向进给平面凸轮 5，通过滚子推动装有辊轮架的拖板 7，完成横向送料。拖板 7 与送料辊 6 轴线成 α 角，α 角由工艺排样决定。拖板 7 的回程靠弹簧实现。

必须保证纵向和横向送料机构的配合。该装置中，凸轮 5 旋转一周，横向送料 8 次，后四次送料时，拖板 7 是后退。凸轮 5 旋转半周时，槽轮机构拨动一个槽，纵向送料一次，进距为 b，凸轮旋转一周，纵向送料两次。

3）参差排样送料装置。图 3.6-37 所示为参差排样送料装置，由纵、横向两部分送料机构组成。纵向送料由曲轴 17 的转动完成，横向送料由辊轮对 9、13 完成。

4）卷料供料装置。卷料供料装置一般由卷料架、校平装置和上油装置组成。

卷料架是支承卷料的供料装置。图 3.6-38 为不带动力的卷料架，该卷料架支撑卷料内圈，因此卷料表面容易擦伤。卷料装在料架的两侧，当一侧的卷料向压力机供料时，另一侧可作上料准备。待一侧卷料用完时，可将卷料架旋转 180°，另一侧即可开卷。

图 3.6-39 所示为另一种不带动力的卷料架，用 2～3 个滚轮支承卷料外圈，为适应不同的卷料宽度，活动夹板可对称地向外或向内调整。该卷料架对于支撑较重的卷料比较稳定，因此可适用于进给速度大以及进料力大的情况，缺点是卷料表面容易划伤。



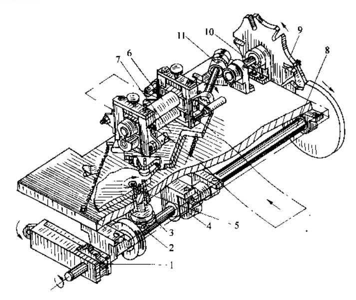


图 3.6-36　横向斜排送料装置

1—棘轮；2、8、10—轴；3、11—锥齿轮；4—直齿轮；5—平面凸轮；
6—送料辊；7—拖板；9—槽轮机构

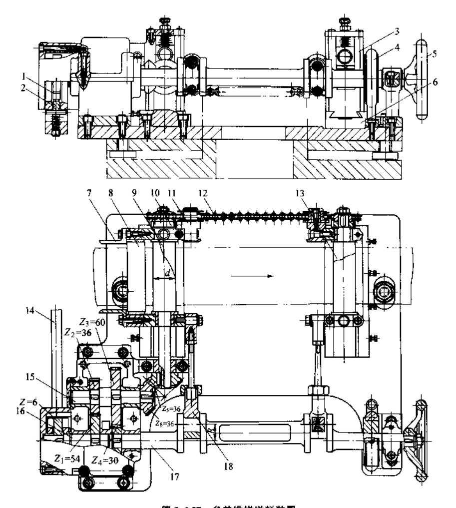


图 3.6-37　参差排样送料装置

1—棘轮；2—棘爪；3—辊子架；4—制动器；5—手轮；6—滑座；7—挡料板；8—润滑辊；
9、13—辊子；10—齿轮；11—张紧轮；12—链条；14—拉杆；15、16—轴；17—曲轴；18—连杆

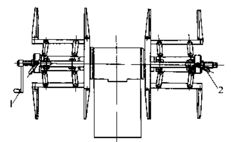


图 3.6-38 回转式卷料架
1—内径调节手柄；2—锁紧手柄

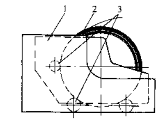


图 3.6-39 外圆支撑的卷料架
1—活动夹板；2—卷料；3—滚轮

不带动力的卷料架是依靠送料装置（或校平装置）对卷料的拉力使卷料展开。带有动力的卷料架可减轻送料装置（或校平装置）的负担，并防止送料时卷料的滑移。图 3.6-40 为用电动机开卷的料架。开卷速度要求与送料速度协调，开卷速度过快会使材料下垂严重，过慢则加重送料装置（或校平装置）的负担，该装置用杠杆 2 触动限位开关 4 控制电动机，达到控制开卷速度。

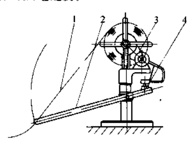


图 3.6-40 用电动机开卷的卷料架
1—材料；2—杠杆；3—电动机；4—限位开关

为了校制开卷速度，还可以用图 3.6-41 所示的装置。在卷料架和送料装置之间设地坑，在坑的前后壁上安装有几组光电管，根据卷料的下垂状态而进行自动调节。在位置 1 时开卷速度提高，在位置 2 时开卷速度降低。

校平装置设置在卷料架与送料装置之间，用以校平从卷料架上展开的弯曲的卷料。

校平装置的结构原理见图 3.6-42。一般在上部设 2～3 个轧辊，下部设 3～4 个轧辊，上部的轧辊在一定范围内可上下调节。大型校平装置用更多的轧辊。

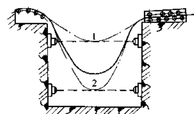


图 3.6-41 光电控制的开卷速度调节

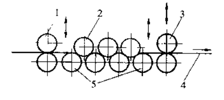


图 3.6-42 校平装置结构原理
1—前夹辊；2—上轧辊；3—后夹辊；4—材料；5—下轧辊

校平装置分为带动力和不带动力的两类。不带动力的校平装置限用于窄料、步距短的情况，材料是由送料装置带动的。这种形式较少使用。一般都是用带有动力的较平装置。常见的有下列三种。

① 由电动机驱动前夹辊卷料，由送料装置将卷料从校平装置中引出而不用后夹辊。适用于薄料。

② 由电动机同时驱动前夹辊及后夹辊分别推动和拉引卷料。适用较上述材料为宽和厚的卷料。附有校平装置的卷料架多数采用这种形式。

③ 由电动机同时驱动前后夹辊与校平轧辊。用于大型的冲压生产线的宽厚料的校平。

表 3.6-16 为材料厚度与轧辊直径的关系。

表 3.6-16 材料厚度与轧辊直径的关系 mm

材料厚度	轧辊直径	轧辊直径工作面最大长度
0.2～0.8	40	1 500
0.4～1.6	50	2 000
0.6～2.3	60	2 000
0.9～3.2	70	2 000
1.2～4.5	80	2 000

校平轧辊用钢制成，精磨。前后夹辊用钢制成后淬硬磨光，或采用表面热胶一层合成橡胶。夹辊用强力弹簧加压。用于宽而厚的材料时，可用单向离合器防止板料由于下垂而后退。

采用辊式自动送料时，如果材料表而不清洁或上油不均匀，会引起辊子与材料表而厚擦力的变化而降低进给精度。材料表而不清洁或没有润滑还会影响模具寿命。因而上油装置也是自动送料中的一个重要环节。

上油装置的形式见表 3.6-17。

1.2 半成品送料装置

冲压生产的过程大致由以下四个步骤组成：送人材料或半成品；冲压；取出半成品或成品；输送给下道工序或放人储物箱。围绕这四个步骤采用的送料装置能提高设备开动率，进而提高生产率和降低生产成本，同时可保证操作人员的人身安全。

半成品冲压件的形状多种多样，致使送料装置的形式也多种多样。送料装置一般由料斗、分配机构、定向机构、料槽、送料机构、出件机构和理件机构等部分组成。半成品冲压自动送料装置组成如图 3.6-43 所示。

半成品零件自料斗出来后，经过分配机构和定向机构把具有正确方位的单个零件通过料槽进入送料机构中，再由送料机构送人模具进行冲压。出件机构把零件从模具中取出，理件机构使零件按顺序排列整齐。

表 3.6-17 上油装置的形式

形式	简图	说明
夹板式		在两块平板间夹油毛毡，材料通过油毛毡时清洁表面并上油 结构简单，但不适用于较脏材料
滚轴式		上下滚筒表面装油毛毡，上滚筒由油管供油，下滚筒浸在油池中，材料通过时清洁表面并上油
	1—刮板 2—中间滚轴 3—上油滚轴	上下滚筒分别由浸在油油中的橡胶滚轴供油，刮板1可调节，控制油膜厚度并使之均匀

料斗
↓
分配机构
↓
定向机构
↓
送料机构 → 冲压 → 出件机构 → 理件机构

图 3.6-43 半成品送料装置

半成品的自动送料装置按外形特征及自动化程度可以分为料斗式自动上料装置和料仓式半自动上料装置。料斗式自动上料装置由人工将半成品倒人料斗后，上料装置自动完成从零件的定向排列到输送零件至冲压工位。主要用于形状简单、重量较轻、批量很大的零件。料仓式半自动上料装置依靠人工将零件定向排列整齐后，才靠机构自动输送零件至冲压工位。主要用于因形状、尺寸或重量而难于自动定向排列的零件，虽批量较大，但也只能采用人工排列。

自动上料装置设计要点如下。

1）考虑生产率高低。生产率愈高，工人上料的劳动强度愈大，愈有采用自动上料的必要。

2）综合考虑自动上料装置的必要性和可能性。根据零件形状、尺寸、重量等因素，确定有无实现自动定向的可能。如有困难，可考虑采用人工定向。

3）在可能情况下应尽量采用自动上料装置。如零件形状简单，尺寸小时。

4）技术经济分析。

(1) 料斗与料仓

料斗的常用结构形式，如图 3.6-44 所示。

料斗的设计要点如下。

1）分析确定工件在料斗中的分布状态。原则上应使零件能适当地聚集在运动着的定向机构附近，以便定向机构有较多的机会抓取到零件使之定向。但也不宜堆积过多，否则将多耗动力，增加磨损。

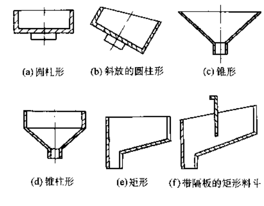
2）确定容纳量。对于小型零件应上料一次能保证持续供料 2 h 以上，对于中等零件，应持续供料 1 h 以上。

3）为增加料斗的容纳量而又不使零件在底部堆积过多，可在料斗内增加隔板，或增加附加料斗。

料仓的结构形式：

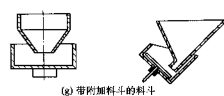
根据工件传送时作用力的不同，可分为靠自重传送和外力传送两类，见表 3.6-18。





(a) 圆柱形　(b) 斜放的圆柱形　(c) 锥形

(d) 锥柱形　(e) 矩形　(f) 带隔板的矩形料斗



(g) 带附加料斗的料斗

图 3.6-44　料斗的结构形式

表 3.6-18　料仓的结构形式

作用力	自重力	外　力
结构形式	管式料仓	弹簧式料仓
	槽式料仓	摩擦式料仓
	斗式料仓	链式料仓
		盘式料仓

按料斗是否有定向装置，可分为定向料斗和非定向料斗。按结构和原理特性，料斗可分为：顶出式、水车式、转盘式和振动式。

1）顶出式料斗。顶出式料斗在料斗中装有顶出机构。零件在料斗内被顶出机构顶出，然后落到料槽中。按顶出机构的结构特点，可分为顶杆式料斗和顶板式料斗。

① 顶杆式料斗。图 3.6-45 所示为顶杆式料斗，该料斗具有定向性能，适用于杯形零件。

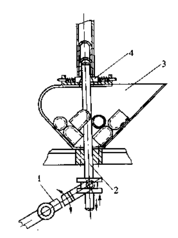


图 3.6-45　顶杆式料斗
1—拨杆；2—顶杆；3—料斗；4—止回锁

将零件装入料斗 3 中，拨杆 1 拨动顶杆 2 作上下往复运动。顶杆下行时，零件堆积在顶杆上方，当顶杆从零件中上升时，口朝上的零件被顶杆顶开，而某个口朝下的零件套入顶杆的上端，被带着上升推入料槽内。零件在进入料槽时，顶开料槽入口处的左右止回销，当顶杆向下退回时，止回销在弹簧作用下挡住零件，不能落下。这样，零件就由下而上被逐个推出。

② 顶板式料斗。顶板式料斗如图 3.6-46 所示，适用于小尺寸的圆块状零件，具有定向功能。

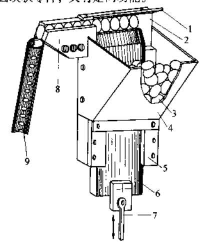


图 3.6-46　顶板式料斗
1—挡板；2—支承板；3—工件；4—料斗；5—滑道盖板；6—顶板；7—连杆；8—出件槽；9—料槽

出件槽 8 的底面和顶板 6 的上端面在同一直线上，并相对水平面倾斜一定角度，零件可自动滚入料槽 9 中。为使直立状态的零件不倾倒，支承板 2 倾斜一定角度。工作时，连杆 7 带动顶板 6 作上下往复运动，顶板上行时，顶板的上端面顶着若干零件上升，如果零件有重叠，顶板上升到终点时，挡板 1 把多余的零件打下，最后只剩下一排零件沿斜面滚入料槽中。

2）转盘式料斗。图 3.6-47 所示转盘式料斗也是一种具有定向功能的料斗。用于输送带凸缘的拉深零件。料斗固定在不动的底盘 9 上，可转动的轴 2 上装有 5 根弹簧 3，当轴 2 带动弹簧 3 和转盘 4 一起转动时，工件被搅动，并按一定方向移动。在料斗壁的下方开有与工件外形相适应的出料口 5。工件在出料口边缘经过时，凸缘向下的工件在弹簧和周围工件推动下，通过出料口进入料槽 7，方位不正确的工件只能从出料口边缘滑过。

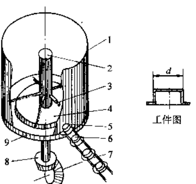


图 3.6-47　定向转盘式料斗
1—料斗；2—轴；3—弹簧；4—转盘；5—出料口；6—工件；7—料槽；8—锥齿轮；9—料斗底盘



图3.6-48所示为一种非定向转盘式料斗，适用于直径大于高度的无凸缘的拉深零件，零件在料槽中完成定向。料斗的中央装有可转动的轴4，锥形套筒3和弹簧2、9均固定在轴4上。轴4带动锥形套筒3和弹簧2、9一起转动时，搅动工件滚动，当底层的工件滚到出料口8时，通过出料口落入料槽中。

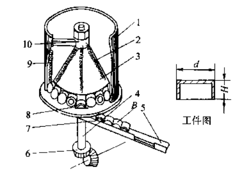


图3.6-48 非定向转盘式料斗

1—料斗；2、9—弹簧；3—锥形套筒；4—轴；5—料槽；6—锥齿轮；7—工件；8—出料口；10—螺母

图3.6-49是一种卧式定向转盘式料斗，用于小型的回转体拉深零件。工作时，轴2带动定向转盘3转动，工件在料斗内被定向转盘带动作翻滚，当某工件的方位与定向转盘出料口的孔形一致时，该工件在其他工件的撞击和本身自重力作用下通过出料口进入料槽中。

图3.6-50是一种非定向转盘式料斗，适用于块状或旋转体零件。轴1通过一对锥齿轮8带动转盘7逆时针方向连续转动。工件装在料盘12中，随着转盘7转动的趋势，沿导轨依次进入转盘。压力机每完成一次冲程，由曲轴带动的杠杆2拨动滑块6向后移动，把停在送料线上的工件推入料槽5中。

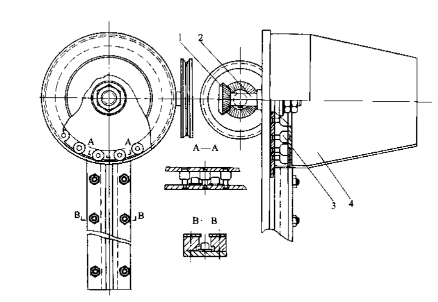


图3.6-49 卧式定向转盘式料斗

1—锥齿轮；2—轴；3—定向转盘；4—料斗

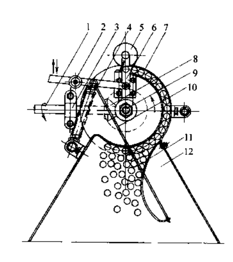


图3.6-50 转盘式料斗

1、9—轴；2—杠杆；3—支承座；4—拉簧；5—料槽；6—滑块；7—转盘；8—锥齿轮；10—拉杆；11—弹性栏板；12—料盘

3）滚筒式料斗 滚筒式料斗也是一种定向料斗，见图3.6-51，适用于Π形零件。零件由装料口4进入滚筒1。滚筒内壁装有叶片，滚筒逆时针方向转动时，叶片带着零件向上运动，到一定高度，叶片向下倾斜使零件向下滑落。落在接料杆5上的零件，如果凹边朝上就被碰落，掉到滚筒下部。如果凹边朝下，就可能落在接料杆上。接料杆有一定的倾斜角度，使接料杆上的零件在自重力作用下沿接料杆滑出。

4）桨叶式料斗 桨叶式料斗如图3.6-52所示。具有定向功能，适用于小的杯形零件。

车轮状转盘1逆时针方向转动，其上的圆柱形轮齿2在通过料斗时，拨动零件，使零件往车轮状转盘方向移动，同时使零件套在轮齿2上，并由轮齿带出。套有零件的轮齿经过料槽底部的长孔时，零件被长孔的两侧边托住，轮齿则从零件中脱出。具有正确方位的零件沿料槽滑走。

图3.6-53所示为另一种桨叶式料斗，适用于Π形零件，也具有定向功能。

5）振动式料斗 振动式料斗上料平稳，没有强烈的搅拌、碰撞等现象，不易损伤零件表面；上料速度较快，直径300 mm的振动料斗，上料线速度可达3～10 m/min，可无级调节，能满足一般生产率的要求；结构简单，通用性广，尺寸小于100 mm，质量小于0.1 kg的零件，几乎都能适用。缺点



是有时有噪声和振动，不能运送有油污、水渍、很轻的薄片和细小零件。

用于小型冲压件的振动式料斗结构如图 3.6-54 所示。料斗 1 的内侧有螺旋料槽，料槽的剖面形状和宽窄由零件的形状和大小来确定。中心轴 2 和料斗连成一体固定在托板 3 上，在托板中部的下方装有衔铁，电磁铁 4 固定在底座 6 中部上面。三片均布的弹性支架 5（弹簧片）、底座 6 和托板 3 连接在一起。弹性支架 5 倾斜一定角度。衔铁和电磁铁的上端面保持一个很小的距离。在底座 6 的下面有三个弹性支撑块，以免振动影响其他设备的工作。

① 工作原理。振动式料斗的工作原理见图 3.6-55。220 V 交流电经过降压和半波整流变成脉冲电流后输入电磁铁，在交变磁场的作用下，衔铁 4 连同料斗 1 和零件一起作上下振动。由于料斗是用三片倾斜的弹簧片支撑的，因而料斗在上下振动的同时必然在圆周方向引起振动，两者合成的振动是螺旋形的。

实际上零件在料槽上运动的微观过程由于设计和调整时参数不同可能有三种情况，见表 3.6-19。

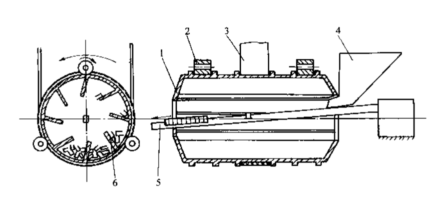


图 3.6-51 滚筒式料斗

1—滚筒；2—支承辊；3—驱动皮带；4—装料口；5—接料杆（滑道）；6—叶片

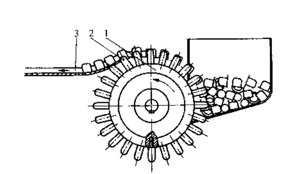


图 3.6-52 桨叶式料斗

1—车轮状转盘；2—轮齿；3—料槽

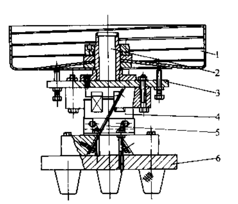


图 3.6-54 振动式料斗

1—料斗；2—中心轴；3—托板；4—电磁铁；5—弹性支架；6—底座

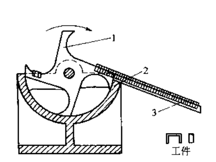


图 3.6-53 用于Ⅱ形零件的桨叶式料斗

1—四齿转盘；2—料斗；3—料槽

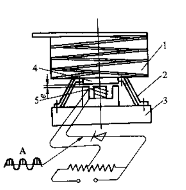


图 3.6-55 振动式料斗工作原理

1—料斗；2—弹性支架；3—底座；4—衔铁；5—电磁铁心



表 3.6-19 工件运动过程和特性

简图	条件特点	适用范围
	1) β 角、吸引力、振幅较大 2) $a_y \gg g$，工件瞬时腾空时间大于料槽下行时间 3) 工件微抛掷跳跃前进、速度较高、平稳性稍差	工件形状简单、表面精加工以前 定向不复杂 要求有较高的上料速度
	1) β 角、吸引力、振幅中等 2) $a_y > g$ 或 $a = g$ 工件瞬时腾空时间小于料槽下行时间 3) 工件微抛掷过间前进，速度稍低，平稳性较好	介乎两者之间
	1) β 角、吸引力、振幅较小 2) $a_y \ll g$，工件不能瞬时腾空 3) 工件曲折前进，速度虽低，平稳性好	细小、精密、脆性、表面精加工过的工件 要求有较高的上料平稳性

注：a 为料槽的加速度，m/s²；a_x 为料槽的水平分加速度，m/s²；a_y 为料槽的垂直分加速度，m/s²；g 为工件的重力加速度，9.8 m/s²；β 为料槽振动斜角，(°)。

② 料斗 料斗的分类及特点见表 3.6-20。

表 3.6-20 料斗类型及特点

分类	简图	特点	分类	简图	特点
盘形		小型料斗用盘形；中大型常用筒形 料斗应尽量轻巧，小型的采用整体结构，用铸铝车削，尼龙、塑料压铸而成；大中型的采用焊接结构 料斗内的料槽，根据需要决定尺寸、螺旋升角和形状	附加料斗	1—附加料斗；2—料斗；3—电磁铁；4—弹簧杆；5—定位芯杆；6—基座	可增加工件的容纳量而不致全部压在料斗底部，过多地改变自振频率
筒形					
内外料槽料斗		内外壁上均有料槽，可同时对两种工件上料定向，常用于多工位自动机 有时为了便于观察工件，只采用外料槽	底部分离料斗	1—附加料斗；2—钢球；3—分离底；4—球轴承；5—料斗；6—支柱；7—弹簧片；8—基座；9—消振弹簧	可增加工件的容纳量而不致改变自振频率，底部与料壁分离浮动，使料斗始终工作在谐振状态，有较高的上料速度

③ 振动源。振动源用以使料斗及料槽产生振动，最常用的是电磁铁，可根据零件的大小和振动料斗所需功率的大小选择一个或三个电磁铁。

对于小型料斗或要求不高的场合，电磁铁绕组可直接接220 V或380 V交流电源，如图3.6-56a所示。较大的料斗或要求上料速度较高的场合，可接入整流二极管半波整流，见图3.6-56b。图3.6-56c为三电磁铁电路，一般以并联接入电源为宜。为了调节上料速度，可在电磁铁绕组线圈上抽头，如图3.6-56d所示。也可采用可变电阻降压，或用自耦调压器或用可控硅无级调压。

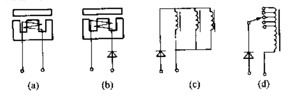


图 3.6-56　电磁铁线圈的电路

料斗一般用三根到四根弹簧片或弹簧杆支撑，主要参数是弹簧倾斜角 β 和刚度及其一致性。斜角 β 一般取 10°～25°，见图3.6-57。

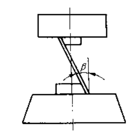


图 3.6-57　弹簧片或弹簧杆安装图

弹簧的刚度对料斗的振动系统有很大的影响，对于中等、较大的零件，原则上应选择刚性相对较低的弹簧，使振动系统处于谐振状态，从而增大振幅并减少能量消耗。对于小型零件，则相对地可以选择较硬的弹簧，使得振动系统处于强迫振动的状态即固有频率大于激振频率。

④ 料斗设计计算。圆筒形料斗的结构如图3.6-58所示。内侧有螺旋滑道，料斗可制成整体的或组合的，可用钢板焊接，也可采用铸造结构。

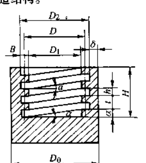


图 3.6-58　料斗结构

a）螺旋料槽的螺旋升角 α　螺旋升角 α 越小，零件上升移动速度越大。α 可按式（3.6-6）计算：

$$\alpha = \arctan\frac{t}{D} \qquad (3.6\text{-}6)$$

式中，t 为螺旋料槽的螺距，mm；D 为螺旋料槽的平均直径，mm。

一般 $\alpha = 1° \sim 6°$。对直径、高度较小的零件，可取 $\alpha = 1° \sim 2°$。

b）螺旋料槽的螺距 t。螺旋料槽的螺距 t 不宜过大，因为 t 大螺旋升角 α 也将增大，或当螺旋升角 α 一定时，t 大则料斗直径将增大。t 的大小一般以保证两个零件重叠在料槽上为宜。取：

$$t = 1.6h + S \qquad (3.6\text{-}7)$$

式中，h 为零件在滑道上的高度，mm；S 为螺旋滑道的厚度，mm。

尺寸较大、形状简单的平板形和圆柱形零件，尺寸为 $L/D > 2$ 或 $L/D < \frac{1}{2}$ 时（L —零件的长度，D —零件的直径），螺旋滑道可做成向上倾斜 3°～4°，如图3.6-59a所示。

薄板形或小尺寸形状简单的零件，螺旋滑道的工作面可向下倾斜 20°～25°，如图3.6-59b所示，并在滑道的内边做成凸起，凸起部分的高度取零件厚度的80%～90%，这样，重叠的零件就会在料斗振动过程中落下。

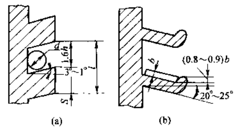


图 3.6-59　螺旋滑道

c）料斗直径 D。料斗直径 D 的计算按式（3.6-8）计算（参见图3.6-58）：

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \qquad (3.6\text{-}8)$$

式中，D_1 为螺旋滑道的内径，mm；D_2 为螺旋滑道的外径，mm。

一般取 $D = (10 \sim 15)t$。当 $\alpha = 1.5°$ 时，$D = 12t$。

d）振动式料斗的供料生产率 Q。供料生产率 Q（件/min）按式（3.6-9）计算：

$$Q = \frac{v}{l_1}K \qquad (3.6\text{-}9)$$

式中，v 为毛坯移动速度，mm/min；l_1 为毛坯沿滑道方向的长度，mm；K 为上料系数，可取 0.7～0.9。

⑤ 振动式料斗的技术参数。表3.6-21～表3.6-24为国内外某些系列化振动式料斗的参数，可供设计及选用时参考。

表 3.6-21　振动式料斗的技术数据（一）

工件最大长度/mm	10	15	20	30	20	30	45
工件最大质量/kg	1	4	6	12	6	12	20
电磁铁数量	1				3		
电压/V	220						
电流/A	0.068	0.114	0.181	0.272	0.272	0.364	0.68
功率/W	15	25	40	60	60	85	150
工件最大移动速度/m·min⁻¹	2～4	2～4	2～4	3～4	3～6	3～6	3～6
振动料斗质量/kg	2.9	7.3	10.2	38	17.5	63	142



表 3.6-22 振动式料斗的技术数据（二）

工件最大长度/mm	4	10	16	20	25	30	40	60	70
工件最大质量/kg	0.05	0.3	0.7	2.0	5.0	10	15	30	60
料斗直径/mm	60	100	160	200	250	315	400	500	630
总体高度/mm	110	190	205	320	330	410	440	640	665
电压/V	220								
电流/A	0.087	0.22	0.22	0.44	0.44	1.09	1.09	2.73	2.73
功率/W	20	50	50	100	100	250	250	600	600
工件最大移动速度/m·min⁻¹	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10
振动料斗质量/kg	1.1	2.8	3.8	10.5	20.5	51.5	71.5	102	122

表 3.6-23 振动式料斗的技术数据（底部分离、浮动的结构）（三）

料斗直径/mm	300	400	540	640	850
总体高度/mm	360	385	415	455	515
电压/V	220				
电流/A	1.18	1.18	2.9	2.9	4.9
功率/W	360	360	640	640	1 080
工件最大移动速度/m·min⁻¹	14	10	10	10	10

表 3.6-24 振动式料斗的技术参数（四）

料斗尺寸/mm	长250	长500	ϕ200	ϕ250	ϕ350	ϕ450	ϕ600
电压/V	200	200	200	200	200	200	200
电流/A	0.1	0.2	0.15	0.2	0.4	0.8	2.0
质量/kg	2.2	10.0	7.8	16	30	56	85

（2）分配机构、定向机构和料槽

1）分配机构。工件从料斗中被推出后，经料槽进入送料机构。在料斗或料槽中设有分配机构和定向机构。分配机构的功用是保证压力机每完成一次行程后，料槽输送一个工件给送料机构。

分配机构的形式有轮式、拨叉式、卡钳式及挡板式等，分述如下。

① 轮式分配机构。如图 3.6-60 所示的轮式分配机构，依靠装在料槽中的转轮作间歇转动，压力机每行程一次转轮转动一齿，输退一个工件。轮式分配机构适用于圆形工件。

转轮的结构和大小由工件的形状和大小来确定。轮齿不宜太多，否则结构庞大。

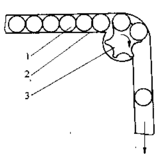


图 3.6-60 轮式分配机构
1—工件；2—料槽；3—转轮

图 3.6-61 和图 3.6-62 所示的分配机构是轮式分配机构的变形，它们是采用一些凹槽或孔洞来代替轮齿分配工件，其工作原理与轮式分配机构相同。

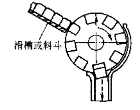


图 3.6-61 鼓轮分配机构

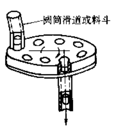


图 3.6-62 转盘分配机构

② 拨叉式分配机构。图 3.6-63 所示的拨叉式分配机构，结构简单，便于制造，适应性强。工作时，轴 5 带动摆杆 4 摆动，在摆杆的上下端装有托杆 3，托杆在摆杆的带动下沿着料槽上的导向孔作往复运动。当摆杆顺时针方向摆动时，下托杆插入料槽，上托杆从料槽中退出，料槽上部的工件便同时下降一个工件的距离，被下托杆托住。当摆杆逆时针方向摆动时，上托杆插入料槽，下托杆从料槽中退出，于是便落下一个工件。

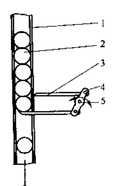


图 3.6-63 拨叉式分配机构
1—料槽；2—工件；3—托杆；4—摆杆；5—轴

③ 卡钳式分配机构。卡钳式分配机构如图 3.6-64 所示。工作时，连杆 1 带动卡钳 2 绕轴 3 摆动，当卡钳向左摆动时，沿料槽滑下一个工件。卡钳向右摆动时，料槽上部的工件滑到卡钳右边被挡住，等待下一次分配。

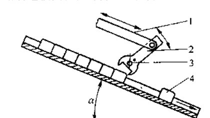


图 3.6-64 卡钳式分配机构
1—连杆；2—卡钳；3—轴；4—工件



④ 挡板式分配机构。挡板式分配机构如图 3.6-65 所示。工作时，连杆 4 带动摆杆 3 向上摆动，轴 2 旋转，挡板 6 离开工件向后摆出，挡板 8 摆进料槽的上方挡住工件，原两挡板间的工件沿料槽滑下。挡板每往复摆动一次，送出一个工件。

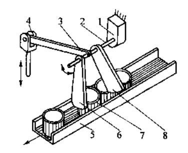


图 3.6-65 挡板式分配机构

1—轴承；2—轴；3—摆杆；4—连杆；
5—料槽；6、8—挡板；7—工件

⑤ 闸门式分配机构。闸门式分配机构如图 3.6-66 所示。在倾斜的料槽中设置一个摆动的闸门，连杆带动闸门摆动时，闸门插入两个紧挨着的工件之间，将工件隔开，同时给正被送进的工件一个加速度。

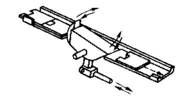


图 3.6-66 闸门式分配机构

⑥ 弹簧钳口式分配机构。弹簧钳口式分配机构如图 3.6-67 所示。在倾斜的料槽出口处设置一个弹簧钳口，挡住工件使之不能滑出料槽。在送料装置上设置一些卡钩，钩住工件的内孔或边缘，强制性地使工件从弹簧钳口脱落下来。

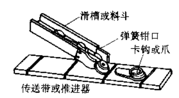


图 3.6-67 弹簧钳口式分配机构

⑦ 柱塞式分配机构。柱塞式分配机构如图 3.6-68 所示。它是用往复运动的柱塞把堆积在料斗或料槽内已定向的工件从料斗或料槽下方推出。如果把柱塞的往复行程延长到模具上，则该装置不仅起分配作用，而且作为送料装置使用。



图 3.6-68 柱塞式分配机构

⑧ 分流式分配机构。分流式分配机构如图 3.6-69 所示。一个料斗同时对两台压力机供料时，使用分流式分配机构可以等量均匀地供料。工作时，分配机构依靠摆片的左右摆动，可以均匀地将工件分配到料槽的两个通道。

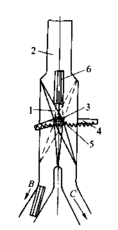


图 3.6-69 分流式分配机构

1—摆片；2—料槽；3—小轴；4—销；5—弹簧；6—工件

2) 定向机构。半成品在进入压力机进行二次冲压前，须按规定方位通过送料机构送入模具中，定向机构的功用是将杂乱无序的半成品按规定方位有序排列。通常采用带有定向机构的料斗来实现对半成品的定向，也可采用在料斗和料槽之间或料槽中设置定向机构来实现。

常见的定向机构分述如下。

① 环形式定向机构。图 3.6-70 环形式定向机构适用于带凸缘的拉深件。制件的定向是通过环形料槽实现的。在环形料槽上端的料槽底部中心有一条尖劈，将左右不同方位的零件分别滚入左右料槽内，所以当零件从环形料槽出来时，具有同一方位，进入后段料槽。

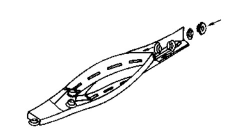


图 3.6-70 环形式定向机构

② 深筒式定向机构。图 3.6-71 深筒式定向机构适用于杯形零件。图 3.6-71a 中，上段料槽滑下的零件，底部朝下时，就直接落入下段料槽；当底部朝上时，由于惯性的作用而斜落在挡销上，零件在重力作用下翻滚下来，底朝下落入下段料槽中。

图 3.6-71b 所示定向机构，通过钩于调节零件的方位。零件从右边料槽进入定向机构，底部朝左的零件，构子钩不住零件，零件底朝下落入下段料槽；底部朝右的零件，构子钩住零件的边，使之底朝下落入下段料槽。

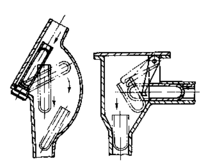


图 3.6-71 深筒式定向机构

③ 滑杆式定向机构。图 3.6-72 滑杆式定向机构适用于浅杯形零件（零件的直径大于高度）。在料槽的一侧开一个缺口，并在此段料槽的底部中间加一条钢丝，且使这段料槽稍向缺口边倾斜。零件滚过料槽时，底部靠向无缺口边的零件，在重力作用下，靠着料槽滑入下段的分配机构。底部朝向料槽缺口边的零件，滑到缺口处时，在重力作用下，从缺口处翻落下去而不能进入下段的分配机构。

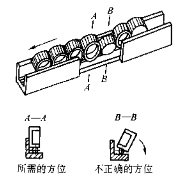


图 3.6-72 滑杆式定向机构

④ 推杆式定向机构。图 3.6-73 推杆式定向机构适用于圆筒形零件。该机构利用在水平方向往复运动的推杆实现零件的定向。零件从上段料槽依次下落到推杆处，最下面的零件若底部朝右，如图 3.6-73a，推杆推零件底部使零件口部朝下落入下段料槽。若零件口部朝右，则推杆向左移动插入零件并将其一直推到最左端位置，如图 3.6-73b 所示。推杆回程时，带爪弹簧板挡住零件，使推杆拔出，零件在自重力作用下口朝下落入下段料槽。

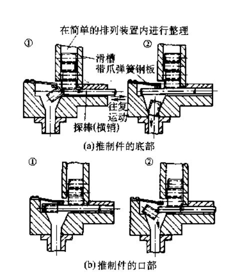


图 3.6-73 推杆式定向机构

⑤ 振动式料斗的定向机构。振动式料斗的定向机构一般都设在料斗的滑道上，工件在上料的前进过程中通过定向机构时，剔除方向不正确的工件；或者使之调头、转向，达到正确的定向。

设计这类定向机构时，首先应分析被定向工件的特点，利用工件尺寸形状的差别或重心位置的差别，来剔除、筛选、区分不同位态的工件。

定向机构和定向方法见表 3.6-25。

表 3.6-25 震动料斗的定向机构

形式	简 图	特 点	设计要点
斜面挡板		可区别、分选竖立或横躺的工件 可剔除重叠的工件 低于挡板高度的工件可通过	挡板的高度稍大于横躺工件的高度 挡板斜角 θ 大于 15°～20°
		允许平放的杯形零件通过	
		每次只允许通过一个零件	
		沿长度方向运动的工件可通过，而横着移动的工件到斜面挡板处就会掉下	
		盒形零件通过挡板时，竖立状态的零件被推倒	
		用于带凸缘的拉深件	

续表 3.6-25

形式	简　图	特　点	设计要点
带棱边的倾斜底面		可分选重心高矮不同的工件 可剔除重叠的薄片工件 重心在底板棱边以内的可通过	棱边高度 $h \approx 0.5 \sim 2$ mm 底面倾斜角 $\gamma = 20° \sim 45°$
半边缺口		可区分开口向上或向下的盖类零件 可区分带内锥面的环形零件	槽宽约等于零件直径 缺口尺寸应能使零件重心落在支承点之外，剔除定向不正确的
		用于盒形零件的定向，允许开口向上的零件通过	
成形孔		筛选不对称的片、块状零件 零件位置和底板上的型孔位置不相应的可通过	槽宽约等于零件宽度 成型孔形状尺寸比零件略大
凹槽		可区分小尺寸阶梯形拉深件 小端向上的可通过	凹槽宽度大于零件小端直径，深度大于小端长度 斜度小于 15°～20°
窄料槽加台阶		可使不对称的片状零件调头定向成重端在前 重心在底板外的零件被剔除	料槽宽度稍大于零件重心到料壁的距离 台阶稍低于料槽，位置靠作图法及实验确定
缺口加可调台阶		可使不对称的片块状零件剔除、调头成一种位态，位态 3、4 的被剔除，位态 2 的调头成 1	缺口宽度及可调台阶位置的确定方法同上，前后调好后用螺钉固定
三角形挡板		可使凸缘朝上的零件通过，凸缘朝下的零件被剔除	三角形挡板与料斗壁之间的宽度及三角形挡板的高度用实验方法确定
成形挡板		可使凸缘朝下的零件通过，凸缘朝上的零件被剔除	成形挡板角度可实验调整 成形孔形状尺寸比零件略大



(3) 送料机构

送料机构的功用是把半成品零件准确地送到模具中，在冲压生产中使用的送料机构类型很多，按运动特性可分为四类，见表3.6-26。按结构特点可分为闸门式、摆杆式、夹钳式和转盘式等。

表3.6-26 送料机构的运动特性及适用范围

类型	运动特性	特点及适用范围
往复运动	轨迹为直线	构造简单，安装容易，但上料速度较慢，广泛应用于单工位机床
摇摆运动	轨迹为圆弧	构造更简单，安装占地少，上料速度可稍高，广泛应用于单工位机床
旋转运动	轨迹为圆周	构造较复杂，占地较多，但上料平稳，生产率可很高，用于多工位机床或要求高效、连续作业的场合
复合运动	轨迹为直线圆弧等复合运动	构造复杂，上料速度不高，用于在上料过程中工件有转位等特殊要求的场合

1）闸门式送料机构。该机构常用于片状或块状零件的输送，送料机构的送料动作是往复运动。工作原理如图3.6-74所示，在料匣的下步有一个出口，将整理好的片状半成品零件放入料匣中，当往复运动的推板3向左移动时，片状半成品零件被从匣底推出一片，直接或逐步推到模具中。当推板3回程从料匣底部退出时，料匣中的片状零件随即落下一片，停在送料线上，完成一个送料循环。

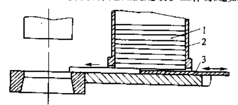


图3.6-74 闸门式送料机构
1—片状或块状零件；2—料匣；3—推板

闸门式送料机构对片状或块状零件的尺寸，精度有一定要求。坯料的厚度不能太小，一般应大于0.5 mm。零件表面要平整，边缘没有大的毛刺，否则会影响该机构工作的可靠性。为保证零件能顺利推出且每次只推出一片，料匣出料口高度应比零件厚度大40%～50%，而推板上表面比被推零件上表面低30%～40%。

料匣出料口高度和推板厚度按式（3.6-10）及式（3.6-11）计算：

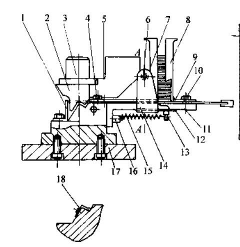
$$h=(1.4\sim1.5)t \tag{3.6-10}$$

$$s=(0.6\sim0.7)t \tag{3.6-11}$$

式中，h为料匣出料口高度，mm；s为推板厚度，mm；t为零件厚度，mm。

推板行程由料匣与模具工作部位的距离、推料方式及压力机滑块行程的大小等因素决定。一般，推板一次行程即把工件推到模具工作位置。当料匣与模具工作位置的距离较大面压力机滑块行程较小时，可以考虑多次行程送料，即推板把工件分级送进或工件在送进过程中是工件推工件，仅最后的那个工件用推板推动。

① 斜楔传动闸门式送料机构。斜楔传动闸门式送料机如图3.6-75所示，主要由送料台11、料匣8、推板10、滚轮支架6、滑动导板12等组成。压力机滑块下行时，装在模具上的斜楔4推动滚轮，使滚轮支架6和滑动导板12向右移动，带动推板10从料匣8中退出。冲压结束后，凸模送出凹模一定高度，滚轮按触斜楔斜面，在弹簧15的拉力下，滑动导板向左移动，带动推板同时向左移动，从料匣中推出一件材料退至模具中。



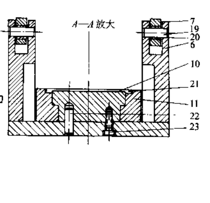


图3.6-75 斜楔传动闸门式送料机
1—定位板；2—凸模；3—模柄；4—斜楔；5—下模；6—滚轮支架；7—滚轮；8—料匣；9—料台盖板；10—推板；11—送料台；12—滑动导板；13—销钉；14—滚轮支架座板；15—弹簧；16—挂钩；17—座板；18—凹模压板；19—滚轮轴；20—滚轮轴瓦；21—工件；22—定位销；23—螺栓

该机构受斜楔工作面角度影响，送料距离较小，可用在行程次数较高的压力机上。一般当工件尺寸小时，送进距离也小。当工件在送进方向上的尺寸为20 mm以下时，压力机行程次数可达150次/min。对于尺寸为20～40 mm的工件，行程次数约100～120次/min。

② 杠杆传动闸门式送料机构。杠杆传动闸门式送料机构如图3.6-76所示，主要由摆杆2、推杆3、推板6和料匣7等组成。

当滑块向下运动时，固定在模具上的压头1推动摆杆2向下摆动，顶杆4的弹簧被压缩，推杆就使推板空载回程。滑块向上运动时，摆杆2在弹簧力的作用下向上摆动，此时推板把材料推到模具上。该机构的主要优点是：当压力机的行程较小时，该机构利用杠杆原理得到较大的送料距离。

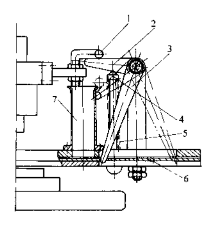


图 3.6-76　杠杆传动闸门式送料机构
1—压头；2—摆杆；3—推杆；4—顶杆；
5—弹簧；6—推板；7—料匣

③ 齿轮齿条传动闸门式送料机构。齿轮齿条传动闸门式送料机构如图 3.6-77 所示，传动机构由齿轮齿条组成。齿条 6 上端的调节螺母保证上模完全退出下模一段距离后，送料推板开始推料。

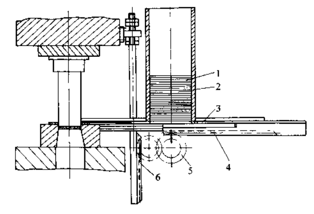


图 3.6-77　齿轮齿条传动闸门式送料机构
1—工件；2—料匣；3—推板；4、6—齿条；5—齿轮

2）摆杆式送料机构。摆杆式送料机构的送料动作为摇摆运动，用于输送小型零件，零件的形状应较规则简单，生产中多用于输送圆形或环形零件。摆杆式送料机构原理如图 3.6-78，它主要由摆杆 1、抓件部分 2、驱动部分 3 等三部分组成。

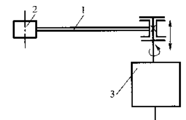


图 3.6-78　摆杆式送料机构原理图
1—摆杆；2—抓件部分；3—驱动部分

摆杆式送料机构不需要长的滑动导轨，只需一个圆柱支承，不占或少占机床工作区域。送料精度较高，但结构比较复杂。

滑块驱动的摆杆式送料机如图 3.6-79 所示。

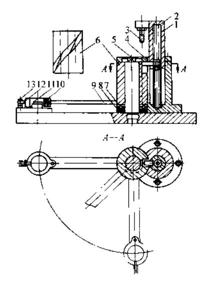


图 3.6-79　摆杆式送料机构
1—滑柱；2—弹簧；3—调节螺栓；4—导销；5—轴；
6—凸轮；7—推力轴承；8—蝶形弹簧；9—摆杆；
10—套圈；11—工件；12—套圈活动臂；13—松套螺栓

该机构由压力机滑块驱动。当滑块下行时，滑柱 1 及导销 4 被压下、凸轮 6 在导销 4 的推动下逆时针方向转动，摆杆 9 也随之绕轴 5 摆动。当调节螺栓 3 碰到凸轮上端面时，摆杆停止转动，凸轮 6 带动摆杆向下移动，此时，摆杆末端的弹性套圈将工件 11 夹住。当滑块回程时，导销 4 推动凸轮 6 顺时针方向旋转，当摆杆转到冲压位置时，松套螺栓 13 顶开套圈活动臂 12 使套圈 10 张开工件就落在凹模上。

3）夹钳式送料机构。夹钳式送料机构如图 3.6-80 所示，主要由夹钳、连杆、滑块、料槽和推料部分等组成。

工作时，压力机滑块向下运动，装在上模 1 的弹性连杆 2 推动滑块 8 及装在滑块上的夹钳 6 向外退出，在夹钳的尾部两侧有斜面，夹钳退出时，夹钳尾部的斜面部分沿着挡块 7 滑动，挡块 7 压缩夹钳尾部间弹簧使钳口闭合停止在接件位置。在夹钳尾部的两侧各有一缺口，带动擒纵叉 4 推出一个工件，工件沿着料槽滑入钳口内。当压机滑块回程时，弹性连杆 2 带动夹钳前进，夹钳尾部斜面沿着挡块 7 滑动并在弹簧的作用下使钳口松开，将坯料放到下模上。

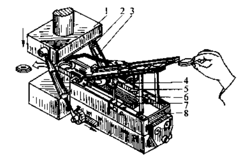


图 3.6-80　夹钳式送料机构
1—上模；2—弹性连杆；3—压料叉；4—擒纵叉；
5—拨块；6—夹钳；7—挡块；8—滑块

4）转盘式送料机构。转盘式送料机构是一种常见的送料机构，它的工作特点是由料斗、料槽落下的单个零件沿着圆周方向送到模具中进行冲压。

① 摩擦传动的转盘式送料机构。摩擦传动的转盘式送料机构如图 3.6-81 所示，该机构的送料精度靠机构本身的制造精度来保证，对棘轮圈的制造精度要求较高。使用中摩擦力调整要适当。



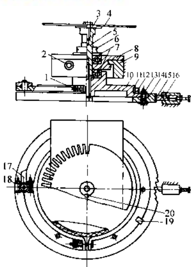
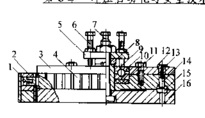


图 3.6-81 摩擦传动的转盘式送料机构

1—摩擦圈调节螺栓；2—拖板定位螺钉；3—定位台；4—转子片；5—轴；6—螺母；7—推力轴承；8—拖板；9—导轨；10—摩擦盘；11—牛皮；12—摩擦圈；13—螺栓；14—棘轮圈；15—止推棘爪；16—棘爪座；17—推杆；18—销轴；19—停止撞块；20—定位键



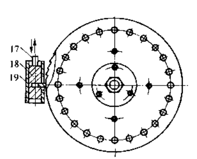


图 3.6-82 棘轮传动的转盘式送料机构

1—弹簧；2—棘爪；3—模座；4—棘轮；5—压板；6—微调螺栓；7—螺栓；8—压圈；9—套；10—止推轴承；11—橡皮圈；12—工件；13—模具；14—顶销；15—弹簧片；16—底板；17—连杆；18—滑块；19—导板

② 棘轮传动的转盘式送料机构。棘轮传动的转盘式送料机构见图 3.6-82。该机构由曲轴端部的四连杆机构带动棘爪作往复运动，转动部分转动惯量较大，影响定位精度。可设置制动系统以提高定位精度。

③ 槽轮传动的转盘式送料机构。图 3.6-83 所示装置用于卧式压力机上，如在槽轮机构上加装大转盘，也可用于立式压力机上。

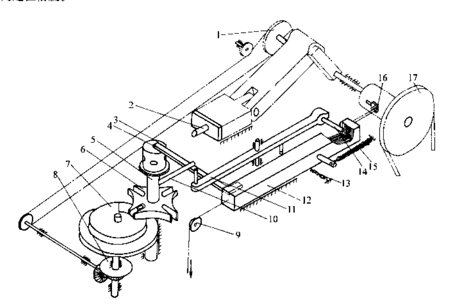


图 3.6-83 槽轮传动的转盘式送料机构

1—链轮；2—冲头；3—工件；4—挡板；5—轴；6—槽轮；7—锁盘；8—锥齿轮；9—滑轮；10—拨杆；11—杠杆；12—滑板；13—拉簧；14—销子；15—拉簧；16—离合器挡块；17—带轮

④ 蜗杆凸轮传动的转盘式送料机构。该机构转盘的齿数和料穴数相等，见图 3.6-84，适用于小尺寸零件的加工。

⑤ 圆柱凸轮传动的转盘式送料机构。该送料机构如图 3.6-85 所示，适用于冲压行程次数较高的压力机，但磨损后不能通过调节进行补偿。

⑥ 链传动的转盘式送料机构。该机构由滑块通过链传动驱动转盘作间歇转动，如图 3.6-86 所示。该机构适用于小尺寸冲压件。

(4) 多工位压力机送料装置

多工位压力机上都配备送料装置，以实现自动化或半自动化生产。

多工位压力机送料装置可以从卷料落料工序开始工作，也可以将平片或成形的工件送入。卷料的送入一般采用辊式送料装置，适用于单排落料或多排交错落料。

以平片送入时，目前多采用真空或电磁吸片装置。

以成形工件送入时，送料装置形式较多，请参阅本章其他章节，或采用工业机械手。

工件在压力机内的输送过程如图 3.6-87 所示。固定在夹板 2 上的夹钳 3，将工件夹紧，移过一个步距，放松夹钳，工件留在新工位上。夹板 2 连同夹钳 3 退至原来位置，完成



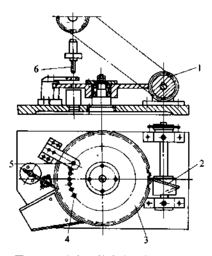


图 3.6-84　蜗杆凸轮传动的转盘式送料机

1—链轮；2—蜗杆凸轮；3—转盘；
4—料穴；5—工作部位；6—模具

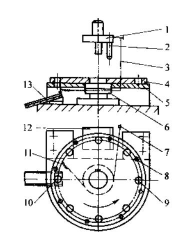


图 3.6-86　链传动的转盘式送料机构

1—上模；2—定位销；3—链条；4—转盘；
5—座板；6—链轮（超越离合器）；7—导向滚轮；8—定位孔；
9—料穴；10—出件工位；11—拉簧；12—下模；13—料槽

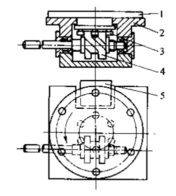


图 3.6-85　圆柱凸轮传动的转盘式送料机构

1—转盘；2—转盘座；3—滚子；4—圆柱凸轮；5—下模

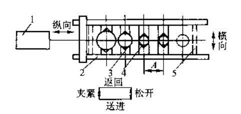


图 3.6-87　多工位压力机送料装置原理

1—纵向驱动机构；2—夹板；3—夹钳；4—制件；5—横向驱动机构

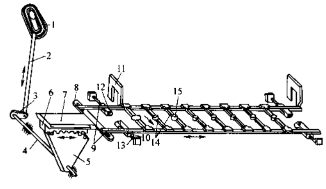


图 3.6-88　多工位压力机送料装置

1—凸轮；2—拉杆；3—转臂；4—轴；
3—扇形齿轮；6—齿条；7、10—滑块；8—连接板；
9—夹板；11—斜楔；12—滚轮；13—弹簧；14—夹钳；15—制件

一个循环。

多工位压力机二向送料装置的机构如图 3.6-88 所示。

1）夹板的工作循环。夹板的送进、张开、退回、夹紧的动作循环见图 3.6-89。

为保证工作可靠，必须在夹紧终了后再过 θ 角才开始送进，同样必须在夹板送进终了后再过 θ 角夹板才开始张开，以免工件因惯性而倒下。

夹板的送进和退回（纵向运动）是由行星齿轮传动机构来完成，张开和夹紧（横向运动）是由另外的张合机构完成。



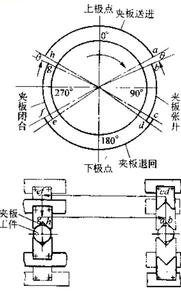


图 3.6-89 夹板的工作循环

行星齿轮传动机构是一种间歇运动机构、加速度特性好、运行平稳，常用于多工位压力机的夹板纵向运动。行星齿轮传动机构工作原理如图 3.6-90 所示。1 是太阳（齿）轮固定不动，节径为 D；3 是行星（齿）轮，节径为 d，行星轮绕太阳轮滚动时，行星轮圆心 A 的轨迹是一个圆。行星轮上有一偏心轴 2，圆心在 B 点，其偏心距为 e。当 $D:d:e=10:5:1$（或近似 1）时，则 B 点的轨迹为一近似腰圆，曲线左右有两条近似直线段Ⅰ、Ⅳ与Ⅱ、Ⅲ。

α_0 角的大小对夹板机构的设计有密切关系。α_0 角小，夹板从开始张开到张开终了的时间就少，因而惯性力大，对张合机构设计不利。

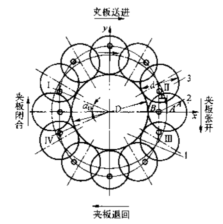


图 3.6-90 行星齿轮传动机构工作原理
1—太阳轮；2—偏心轴；3—行星轮

偏心轴驱动夹板作纵向运动，在近似直线部分，纵向运动停止，仅有微量波动。此时张合机构动作，使夹板作横向运动，见图 3.6-91。

当采用行星式传动机构时，图 3.6-90 中的 α_0 角可按式（3.6-12）计算：

$$\alpha_0=\arccos\frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{15}{2K}}-1\right) \tag{3.6-12}$$

式中，K 为偏心系数，可近似取为 1。

α_0 角一般取 5°。

2）送料装置参数确定

① 工位数。按零件实际需要确定，并适当考虑空工位及出料工位。专用多工位压力机工位数最多可达 14～18 个，普通压力机改装以 8 工位以下为宜。

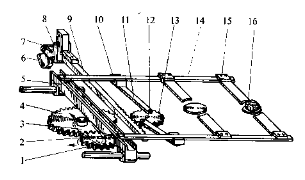


图 3.6-91 夹板进给机构
1—行星齿轮；2—偏心轴；3—行星齿轮架；4—太阳轮；5—槽形导轨；6—凸轮；7—滚子；8—拨杆；9—齿条；10—夹板架；11—拉杆；12—偏心销；13—齿轮；14—夹板；15—卡爪；16—工件

② 工位距 A。当 $D>250$ mm 时，$A=(1.12\sim1.25)D$；当 $D<200$ mm 时，$A=(1.4\sim2.0)D$。

式中 D——最大落料直径，mm。

③ 夹板闭合后内侧距离 B_1。多工位压力机上装有落料模时，内侧距离 B_1 根据落料模模座尺寸增加 10～20 mm。

④ 夹板张开后内侧距离 B_2。夹板张开后内侧距离 B_2 按式（3.6-13）计算：

$$B_2=B_1+2B \tag{3.6-13}$$

式中，B 为夹板单面张开量，mm。

夹板单面张开量 B，是根据夹板在闭合时夹钳夹住工件，而张开时夹钳能通过模具闭合时的导柱外侧确定的，见图 3.6-92。

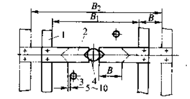


图 3.6-92 夹板单面张开量

3）横向夹紧驱动机构。横向夹紧驱动机构有斜楔传动、斜楔齿轮齿条传动和曲柄连杆传动等几种，见图 3.6-93～图 3.6-95。

4）纵向送料机构。纵向送料机构有凸轮杠杆传动、凸轮传动、齿轮齿条传动、气动和行星齿轮传动等形式，如图 3.6-96～图 3.6-100 所示。其中行星齿轮传动由于其运动平稳、冲击小和定位精度高而得到广泛应用。

5）三向多工位送料装置。为适应输送平面上有突起障碍的情况，三向多工位送料装置的夹板增加了“上升、下降”两个动作，即夹板按“夹紧—上升—送进—下降—放松—退回”作动作循环，使多工位压力机加工产品的范围得到扩大。但三向多工位送料装置，结构复杂，速度相对较慢。

三向送料装置动作周期如图 3.6-101 所示，可作三向送料装置设计时的参考。从图中可知，夹板的上升和下降两个动作与送进动作有一段时间同时进行。放松和夹紧也是这样，在完全放松前就开始边继续放松边开始后退，退回到前一工序模具中心前，夹钳开始闭合，同时继续退回。这样可使动作周期更紧凑，但是在上升前和下降后，夹钳必须停一段短时间，使工件停稳才开始进行其他动作。上升或下降动作可由凸轮机构或气缸装置来实现。

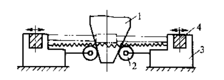


图 3.6-93 斜楔驱动横向夹紧驱动机构
1—斜楔；2—滚轮；3—滑座；4—夹板

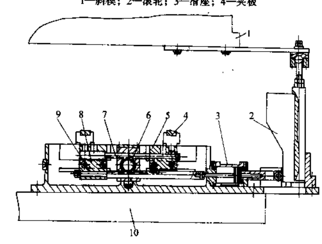


图 3.6-94 斜楔齿轮齿条传动横向夹紧驱动机构
1—滑块；2—斜楔；3—气缸；4—夹板；5—右夹板架；
6—中间齿轮；7—上齿条；8—左夹板架；9—下齿条；10—垫板

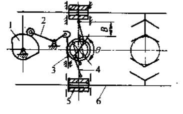


图 3.6-95 曲柄连杆传动横向夹紧驱动机构
1—凸轮；2—摆杆；3—齿条；4—连杆；5—滑座；6—夹板

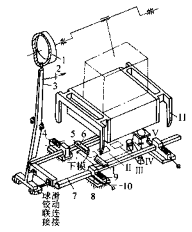


图 3.6-96 凸轮杠杆传动纵向送料机构
1—凸轮；2—弹簧；3—杠杆；4、8—滑架；5—滚子；
6—夹爪；7—夹条；9—长槽；10—弹簧；11—斜楔

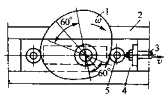


图 3.6-97 凸轮传动纵向送料机构
1—凸轮；2—机架；3—连接杆；4—滑块；5—滚子

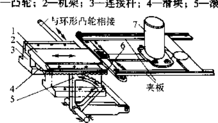


图 3.6-98 齿轮齿条传动纵向送料机构
1—送料滑块；2—导轨；3—滑块；4—齿条；5—扇形齿轮；
6—送料推板；7—料筒

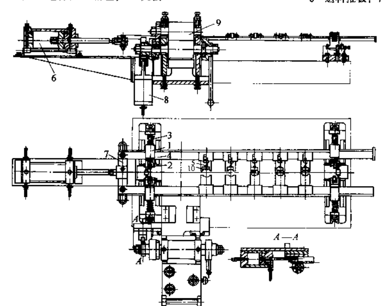


图 3.6-99 气动式纵向送料机构
1—夹紧滑块；2—滚子；3—弹簧；4—夹板；5—夹钳；6—气缸；
7—推板；8—气缸；9—送料辊；10—定位触头



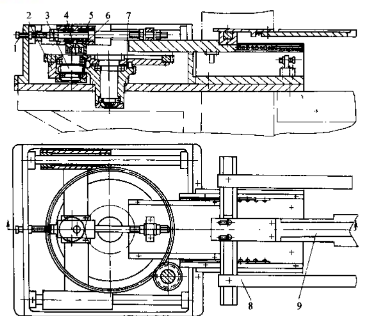


图 3.6-100 行星齿轮传动纵向送料机构

1—定位挡块；2—转臂；3—行星齿轮；4—偏心轮；5—弹簧装置；6—槽形导轨；7—中心齿轮；8—夹板；9—推板

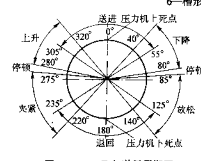


图 3.6-101 三向送料周期图

三向送料装置结构如图 3.6-102 所示，该装置由曲轴端的链轮通过齿轮、凸轮四连杆机构等驱动各部分工作，其中，夹板的上升和下降，通过由大凸轮 18 推动齿条 7，带动小凸轮 33 抬升滑块架 24 来实现。

(5) 出件装置

出件装置的作用是把冲压完成的工件或工序件及时送出，使之处于一定位置，以便整理或输送，同时避免影响送料装置的正常工作。送料装置和出件装置配合使用，能大大减轻工人的劳动强度，防止工伤事故。

按传动方式，出件装置有气动和机械传动两种。

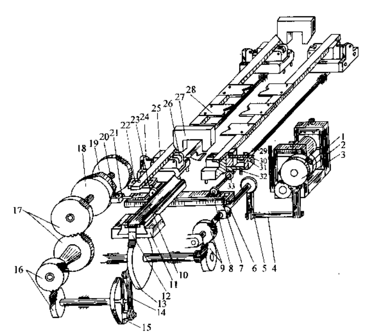


图 3.6-102 三向送料装置

1—滚筒；2、17—齿轮；3—超越离合器；4、14—连杆；5—摆杆；6、31—弹簧；7、12—齿条；8—槽钢；9、16—斜齿轮；10—推料板；11—燕尾槽；13—大齿轮；15—偏心盘；18—大凸轮；19—链轮；20、26—滑轮；21—滑轮支架；22—夹板；23—小齿轮；24—滑块架；25—滑块；27—斜楔；28—夹钳；29—凸轮轴；30—导柱；32—导销；33—小凸轮

在不需要理件时，可采用气吹式出件装置，利用压缩空气将工件从模具中吹出。

图 3.6-103 为气吹式出件装置。冲压完成后，压力机曲轴带动的凸轮 3 顶起阀杆 2，接通进气口和出气口，压缩空气通过喷嘴喷出，把工件吹走。

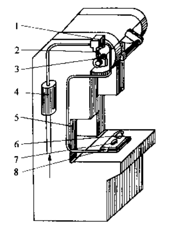


图 3.6-103　气吹出件装置
1—气阀；2—阀杆；3—凸轮；4—储气筒；5—管道；6—工件；7—下模；8—喷嘴

根据工件是上模出件还是下模出件的不同，气吹式出件装置如图 3.6-104 所示。

常见的出件装置见表 3.6-27。

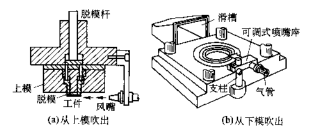


图 3.6-104　气吹出件装置方式

(6) 理件装置

理件装置的作用是将工件（多数为冲裁件）按照--定的顺序加以整理，以及将级进模冲压时混杂在一起的工件和废料加以区分与整理。理件装置的结构形式根据模具冲压时具体情况而定。常见的理件装置如表 3.6-28 所示。

表 3.6-27　出件装置的型式

型式	简　图	说　明
连杆式出件装置	(a)滑块在上极点　(b)滑块在下极点 1—上模；2—接件器；3—下模	为小型冲件最简单的出件装置 安装在上模 1 与下模 3 上的连杆由中间轴销铰接，并在此轴销上安装接件器 2，滑块在上极点时（图 a），接件器 2 伸入上下模间接住从上模打下的工件。滑块下行程时，接件器退出，到下极点时（图 b），接件器倾斜，工件落到盛器中
摇板式出件装置	1—接件器；2—拉杆；3—可调节拉杆	接件器 1 固定在拉杆 2 上，拉杆 2 的一端铰接在压力机床身上，可以调节长度的拉杆 3 一端铰接在压力机滑块上，另一端又与接件器 1 铰接。滑块上下行程时，接件器作摆动。滑块上行程时，接件器摆动到上下模间，接住工件，因为接件器是倾斜的，故工件可沿其表面滑落到盛器内
缩放仪式出件装置	(a)接件状态　(b)模具闭合状态 1、2—杠杆；3—接件器	该装置可以由单个缩放仪或几个缩放仪组合起来。节数多则动作圆滑并可以将工件接出较远距离。设计时需注意不使机构与模具碰撞 这种机构适用于中小型工件的冲压



续表 3.6-27

型式	简　图	说　明
大型缩放仪式出件装置		用于大型工件 在出件状态下与模具闭合状态下，接件器的倾斜度不变，接件器上有用长的滚柱组成的辊道，可使工件易于滑下
滑道式出件装置	(a) 接件状态　(b)模具闭合状态 (c) 齿轮齿条传动的滑道式接件装置	在上模上使用杠杆，在下模上使用滑道与滚柱。接件器的轨迹决定于滑道形状，是一种较好的方法 上模下降时接件器退出 结构复杂，但动作平稳，适用于大型冲件的接件
回转式出件装置	1—凸轮；2—滚轮；3—支架；4—轴；5—接件器；6—扭转弹簧	凸轮1安装在压力机滑块上，作上下运动，支架3固定在压力机床身上 压力机滑块下降时，凸轮1推动滚轮2使轴4回转并带动接件器5退出模具工作区，压力机滑块上行程时，由扭转弹簧6将接件器转入模具工作区接件
利用气缸的大型出件装置	行程	对于汽车覆盖件等大型冲件，接件器笨重，用杠杆等形式接件困难，因此可利用气缸。应保证压力机行程与接件器动作协调，可用压力机回转限位开关通过电磁阀来操纵气缸，也可用压力机滑块控制限位开关或直接控制空气分配阀 为保证安全，宜用木材或塑料做接件器

表 3.6-28　理件装置的型式

型式	简　图	说　明
隔板分离理件装置	工件　废料　(a) 废料　工件　(b)	连续式冲裁模的理件装置，是用隔板将废料与工件隔开，不使废料混杂在工件内 工件并不能叠齐

续表 3.6-28

型式	简　图	说　明
用滑槽分类的理件装置		用复合模同时冲出两种工件，两种工件同时落在上滑槽内，上滑槽上有孔，较小的工件漏到下面的滑槽内 工件从滑槽内滑下，落在芯轴上自行叠齐。芯轴可以带键销等导向装置，以便理齐有方向性的工件，如电动机定转子冲片
依靠工件重力的理件装置		工件从滑槽内滑下，依靠工件的重力自动理料
依靠工件重力的理件装置		理件装置直接装在下模下部，工件自动叠齐
利用流槽的理件装置	A—A 橡皮	工件流槽直接设在下模下部，流槽是根据工件外形用铁丝围成，流槽的工件取出部分做成开口的。开始冲压前，流槽应填塞橡皮如图，以便工件叠齐
利用螺杆提升的理件装置	1—滑槽；2、3—螺杆	工件在滑槽1内滑下，落在螺杆2和3的螺旋槽内，螺杆2和3以相反方向相同速度转动，使工件提升到流槽内堆积起来

1.3　自动检测保护装置

自动检测保护装置代替操纵人员，检测监督冲压各环节，包括原材料、进给及出件，保证操作人员、设备及模具安全。

自动检测保护装置的传感方式，有接触式和非接触式两种。接触式主要通过机械方式使电触头动作，非接触式通过电磁感应、光电或 β 射线等取得信号。

信号可以分成两类，一类是从单独一个保护装置的信号（导通或切断）就可以判断有无故障；另一类信号必须与冲压工作循环的特定位置或时刻相联系，才能判断有无故障。冲压工作循环的特定位置或时刻也用信号表示，以便比较判断。前一类信号称为Ⅰ型，后一类信号称为Ⅱ型。

自动排除冲压加工中的故障，还存在程度不等的困难。目前对自动检测保护装置的要求，是在发生故障时使压力机迅速停止。对于滑块行程次数不超过每分钟 120～200 次的压力机，电子控制的自动检测保护装置发现故障后可使滑块在同一行程中停止。压力机行程次数更高时，只能在完成这一行程后停止。如果此时摩擦离合器已脱开，则滑块下行并无飞轮驱动，可以使模具损伤减至最小。

（1）监视原材料的自动检测保护装置

当材料厚度或宽度超差、弯曲或起拱以及卷料用完时，自动检测保护装置都能发出信号。

监视原材料的自动保护装置见表 3.6-29。

表 3.6-29　监视原材料的自动保护装置

监视对象	简　　图	传感方式	信号类型	说　　明
料厚	1—限位开关；2—杠杆；3—圆销；4—材料	接触	Ⅰ型	材料 4 过厚时，圆销 3 通过杠杆 2 使限位开关 1 动作，切断线路
料厚	1—放射源；2—材料；3—传感器；4—放大器	β 射线	Ⅰ型	放射源 1 发出的射线，穿过材料 2 由传感器 3 接收，经放大器 4 通向控制线路。传感器 3 接收的射线随料厚改变
料宽	1—导料板；2—支点；3—转臂；4—限位开关；5—扭簧；6—滚柱；7—承料板	接触	Ⅰ型	料宽超差时，扭簧 5 通过转臂 3 使限位开关 4 之一动作，切断线路
起拱	1—材料断面；2—叉；3—支点；4—拉簧；5—开关	接触	Ⅰ型	材料 1 起拱时，叉 2 绕支点 3 转动，开关 5 导通控制回路
起拱	1—绝缘支架；2—导电叉	接触	Ⅰ型	材料起拱时，固定在绝缘支架 1 上的导电叉 2 与材料接触，导通控制回路



续表 3.6-29

监视对象	简图	传感方式	信号类型	说明
横向弯曲	凹模 横向弯曲允许值 1—导料钉；2—导电杆；3—绝缘套；4—承料板	接触	Ⅰ型	材料横向弯曲超差时，与导电杆2接触，导通控制回路
料尾	1—杠杆；2—支点；3—常分限位开关；4—支承；5—材料	接触	Ⅰ型	工作时材料5抬起杠杆1下端，开关3合上。材料尾部通过杠杆1下端后，杠杆作逆时针方向旋转，与开关3脱离，切断线路
	1—导电杠杆；2—绝缘套	接触	Ⅰ型	导电杠杆1与材料接触（左图），维持控制回路导通。材料用完时（右图）控制回路切断

(2) 防止原材料误送的检测装置

防止原材料误送的检测装置见表 3.6-30。

表 3.6-30　防止原材料误送的检测装置

名称	简图	说明
定位检测法	1—传感器；2—定位挡块；3—剪切凸模；4—带料	在定位部位设置传感器1，当带料4送到预定位置，并接触传感器，压力机滑块向下冲压。一旦送进距离不够时，带料4便不能接触传感器，滑块也就不能下降
自动检测法	1—张力弹簧；2—自动挡销；3—支点；4—传感器；5—带料	杠杆式自动挡销2以支点3为中心可左右摆动。当带料5每次送进时，搭边的左侧推动自动挡销的 A 端逆时针方向摆动。当送进距离达到要求时，自动挡销的 B 端便与传感器4（或微动开关）的接触端子相碰，压力机滑块即可向下冲压。当不碰触时，可以认为带料尚未送到位，此时压力机不能工作

续表 3.6-30

名称	简图	说明
触头式检测法	1—凹模固定板；2—卸料板；3—凸模固定板；4—检测钉；5—检测杆；6—弹簧；7—微动开关 1—凹模固定板；2—卸料板；3—凸模固定板；4—检测钉；5—垫板；6—弹簧；7—微动开关	若条料由于各种原因导致送不到位时，检测钉4无法正常导入相应的导正孔中，载体便顶起检测钉触动微动开关7中常闭触头切断，压力机滑块则处于停止状态
光电式检测法	1—光电检测器；2—载体	光电检测器安装在级进模的载体出口端，检测头对准载体上导正钉孔。检测头的一端安装有发射元件，另一端安装有接收元件。接收元件通过小孔接收发射元件发出的信号。当带料向前运动定位准确时，检测头接收孔与条料检测孔位置一致，有光通过，接收元件接收到光信号。如果送料不准，则接收元件在送料动作完成后仍不能接收到发射元件的光信号，即发出停机信号

(3) 监视进给的自动检测保护装置

监视进给的自动检测保护装置见表 3.6-31。

表 3.6-31 监视进给的自动检测保护装置

监视对象	简图	传感方式	信号类型	说明
材料误送	1—弹簧；2—常合限位开关；3—推杆；4—导正销	接触	Ⅰ型	导正销4未能进入材料上的孔内时，压缩弹簧1，导正销4继续后退把推杆3向右推出，切断线路

续表 3.6-31

监视对象	简　　图	传感方式	信号类型	说　　明
材料误送	1—支点；2—支架；3—杠杆； 4—调节螺钉；5—手动复位开关	接触	Ⅰ型	材料误送，导正销抬起，杠杆 3 右端合上开关，导通控制回路。开关 5 下端有手动复位按钮
	1—弹簧；2—导线；3、4—绝缘垫； 5—金属盖；6—固定板	接触	Ⅰ型	材料误送，导正销抬起（如下图）。金属盖 5 与固定板 6 脱离，切断由件 2、5、6 组成的回路
	1—卸料板；2—材料；3—凹模； 4—绝缘套；5—导电销；6—弹簧	接触	Ⅰ型①	废料孔略大于导电销 5 前端直径。送料正确时，导电销 5 不与料 2 接触，线路切断；误送时两者接触，线路导通
	1—凸模；2—卸料板；3—材料；4—凹模； 5—支点；6—杠杆；7—圆销；8—弹簧； 9—常合限位开关；10—支架；11—螺钉； 12—推杆；13—弹簧；14—支件	接触	Ⅰ型①	冲程向下，推杆 12 借弹簧 13 之力把杠杆 6 压下，使圆销 7 退出材料。冲程回升时，如材料误送，则销 7 不能进入材料上的孔内，开关 9 与螺钉 11 接触，切断常合线路



续表 3.6-31

监视对象	简　图	传感方式	信号类型	说　明
工序件定位	1—常分限位开关；2—推杆；3—弹簧；4—工件；5—定位板	接触	Ⅰ型②	工件4定位正确，则推杆2与开关接触，线路导通，对于较大的工件，可用几个类似装置
工序件被抓住	1—接触片；2—绝缘体；3—卡爪；4—夹板	接触	Ⅱ型③	用于多工位自动压力机，冲较矮的工序件。未抓住工序件或夹板开启，两接触片相碰，线路导通。抓住工序件两接触片分离，线路切断
	1—绝缘体；2—接触片；5—卡爪；4—夹板	接触	Ⅱ型③	用于多工位自动压力机，冲较高的工序件。未抓住工序件或夹板开启，两接触片分离，线路切断。抓住工序件两接触片相碰，线路导通
工序件用完	1—推板；2—顶杆；3—常分限位开关；4—弹簧	接触	Ⅰ型	储件斗内的工序件用完时，弹簧4将顶杆2抬起，与开关3脱离接触，切断线路

① 材料误送时的信号状态，与送料过程中的信号状态相同，因此信号必须与冲压工作循环相联系。

② 工序件尚未送入时的信号状态，与工序件定位不正确的信号状态相同，故信号必须与冲压工作循环相联系。

③ 卡爪释放工序件后的信号状态，与未抓住工序件的信号状态相同，故信号必须与冲压工作循环相联系。

(4) 监视出件的自动检测保护装置

监视出件的自动检测保护装置见表 3.6-32。

表 3.6-32 监视出件的自动检测保护装置

监视对象	简图	传感方式	信号类型	说明
出件	(a) (b) (c) (d) (e) 1—传感器；2—滑道	接触	Ⅰ型①	工件通过时与传感器 1 接触，线路导通 图 e 滑道宽阔，工件通过时和任意相邻两传感器接触，导通线路
	工件出此通过 1—凹模；2—落料凸模；3—非磁性材料管	感应	Ⅰ型①	工件通过非磁性材料管 3 时，产生感应信号。适用于磁性材料的冲件
顶（打）出装置	未顶出时端部路径 端部正常动作路径 压力机控制回路 1—常合开关；2—转臂；3—弹簧圆销；4—顶板；5—支架	接触	Ⅰ型	顶板 4 未被弹簧顶出时，弹簧圆销 3 随上模回升触动转臂 2，切断常合线路
	1—工件；2—传感器（头部绕成弹簧形）；3—冲孔凸模；4—顶板；5—落料凹模	接触	Ⅰ型	在正常工作时，顶板 4 和传感器 2 间有不小于 t 的间隙，线路不通。如工件未能顶出，下次冲裁又多积一件，则顶板 4 和传感器接触，导通线路

续表 3.6-32

监视对象	简　图	传感方式	信号类型	说　明
顶（打）出装置	开模时顶板端部正常位置 1—绝缘套；2—顶板；3—弹簧；4—绝缘圈；5—弹簧圈；6—金属管；7—凹模	接触	Ⅱ型	合模时电路接通，开模时顶板 2 顶出则断路，未顶出则通路。故障与合模时信号相同，故必须使信号和冲压工作循环相联系，以资区别
	1—撞块；2—卸料螺钉；3—调节片；4—支架；5—顶板；6—工件式条料；7—上模；8、10—常分限位开关；9—撞块螺钉；11—槽形防护架	接触	Ⅱ型	合模时撞块螺钉 9 触及常分限位开关 10，线路导通。开模时螺钉 9 与开关 10 分离，线路切断，但顶板 5 触及常分限位开关 8，另一线路导通。如顶板 5 未能顶起，则两线路均切断，压力机停止运转。调节片 3 厚度应达到以下要求：行程向下顶板 5 与常分限位开关 8 脱离前，螺钉 9 已与开关 10 接触，行程向上螺钉 9 与常分限位开关 10 脱离前，顶板 5 已与常分限位开关 8 接触

① 冲压工作循环中，大部分时间无工件逸出属于正常情况，但此时信号状态与应有工件逸出而未逸出相同。为了识别有无出件故障，信号必须和冲压循环相联系。

1.4 冲压自动线

冲压机械化自动化概括起来有三种基本途径：第一，使用带料生产的自动压力机，目前广泛用于小型零件的冲压生产；第二，多工位压力机，由于其进料距离较小（一般小于 500 mm）仅适用于中小型零件，特别是圆形和方形零件的冲压生产；第三，冲压自动线。冲压自动线广泛应用于大中型零件的冲压生产中。

若干单台自动冲压设备联接成一条线进行自动化冲压的生产线称为冲压自动线。

冲压自动线具有如下优点。

1）提高了劳动生产率。

2）减少了操作人数。

3）降低了对工人的技术要求，减轻了工人的劳动强度，改善了劳动条件，保证了安全生产。

4）压力机布置较紧凑，减少了生产面积。

5）生产速度稳定，管理较容易。

6）降低了生产成本。

（1）冲压自动线的分类和组成

对于小型零件的生产，可以采用连续模在一台压力机上连续加工，而当大中型零件有多道工序需要连续自动冲压时，不可能采用类似小型零件的自动冲压方案，冲压自动线可以解决大中型零件的冲压自动化问题。即使冲压小型零件，有时从技术上讲也可以添置新的设备和模具，在一台压力机上实现自动冲压，但按现有条件，利用原有压力机和模具，通过技术改造实现冲压自动线更为合理。

按连接压力机上下料装置的不同，冲压自动线可以分为专用上下料机械手冲压自动线、通用机械手冲压自动线和夹板式往复送料冲压自动线。

1）专用上下料机械手冲压自动线。这类冲压自动线，通常由 4～8 台压力机组成，配备的压力机都是贯通式排列的，即压力机的正面在一直线上，先后贯通，如图 3.6-105 所示。为了便于从压力机床身侧面装拆模具，压力机侧面应开有足够大的窗口容许模具通过。有的自动线全部由单动压力机组成，各台压力机之间的距离一般相等；有的自动线第一台压力机是双动压力机，以便完成拉深工序。这台压力机与相邻单动压力机的距离，应比自动线上其他单动压力机间的距离大，以便容纳冲压件翻转装置以及检查、排除废品工位。

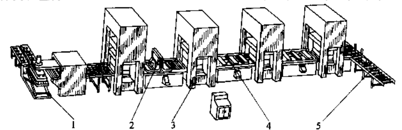


图 3.6-105　贯通排列的冲压自动线
1—板料传递装置；2—翻转装置；3—压力机；4—工序件传递装置；5—辊道



① 生产流程。上件机械手、出件机械手和间歇输送装置组成的自动线的生产流程大致是：

板料传递和上料装置把料送入第一台压力机→第一台压力机冲压→出件机械手把工件取出，放在间歇输送装置上→间歇输送装置把工件逐步送至上件机械手工作位置→上件机械手从间歇输送装置上把工件取走，放入第二台压力机→第二台压力机冲压→……→最后一台压力机冲压→出件机械手把零件取出，放在传送带上运走。图 3.6-106 为上件机械手、出件机械手、间歇输送装置和压力机的相互位置关系。

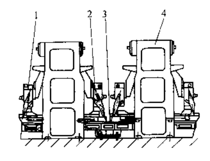


图 3.6-106　上、出件机械手连接的冲压自动线

1—上件机械手；2—出件机械手；
3—间歇输送装置；4—单动压力机

出件机械手和上件机械手结构相同，对称布置。机械手的“手指”用真空吸盘或夹钳。

间歇输送装置由两条传动链组成，沿送进方向对称布置，间距可自由调节。链的两端各有一升降台，台上有 T 形槽，用以安装各种定位夹具，接纳不同形状的工件。

② 自动线的动作协调。冲压自动线生产时，每一台压力机必须和相应的机械装置（上料装置、上件机械手、出件机械手、间歇输送装置、翻转装置等）动作协调。协调可以由两种方式实现：一种是机械装置由压力机通过机械机构传动，另一种是机械装置和压力机电器联锁。

③ 自动线的同步。冲压自动线的同步分为间歇同步和连续同步两类。

间歇同步是各台压力机单次运转，但若第一台压力机是双动压力机时，由于滑块行程次数较低，往往连续运转。其余的压力机由恒速交流电动机驱动，这些压力机必须让滑块在上极点作瞬时停留，以求与其他压力机运动协调。间歇同步生产率较低，离合器和制动器容易发热磨损。

连续同步是各台压力机全部连续运转。如果各台压力机的工艺负荷相近，滑块行程次数基本相同，可采用交流绕线式电动机通过控制回路自动调整电阻，保证压力机同步运转。为使调整稳定，一般先把同步相位差较大的，重新匹配控制回路电阻，以接近于同步，然后选用小的电阻调节当量，确保压力机曲轴转角误差在 ±5°以内。这种方法控制系统较简单，费用较省，适宜于老设备的自动线改造。

当各台压力机的工艺负荷相差悬殊，滑块行程次数并不一致时，为使压力机连续同步，需要由直流电动机驱动，以便于调速。这种方法控制系统复杂，造价较高，适宜于自动化程度高，生产批量大的冲压自动线。

2）通用机械手冲压自动线。由于通用机械手可以有较多的动作方式，因此这类自动线的布局存在多种方案。组成不同方案的设备因素有：

① 机械手动作方式；

② 工序件输送方式；

③ 第一台压力机上料或上件装置；

④ 压力机床身的形式。

一般说来，圆弧运动的机械手不宜用于闭式压力机，因为机械手的运动路线被压力机侧面阻断。

图 3.6-107 的冲压自动线，由短料传递装置、夹持送料机构、两台压力机、一台通用机械手和传送带组成。机械手有两个手臂，作圆弧运动。第一个手臂把第一台压力机上加工过的工序件取出，放入第二台压力机。第二个手臂把第二台压力机冲出的工件取出，放到传送带上运走。

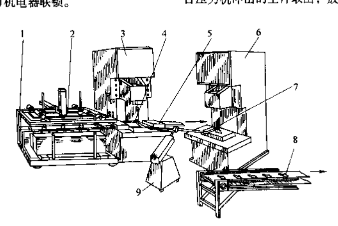


图 3.6-107　通用机械手组成的冲压自动线

1—短料传递装置；2—移料机构；3、6—压力机；4、7—手指；
5—夹持送料机构；8—传送带；9—通用机械手

图 3.6-108 的冲压自动线，由上件装置、4 台压力机和 4 台通用机械手组成。落料拉深所得的工序件，倒入料斗，经定向和分配机构逐件送出，然后由机械手和传送带把工序件依次送进，在各台压力机上加工。每台机械手各有两个手臂，上件手臂接住工序件放入冲模，出件手臂从冲模中取出已加工的工序件放到传送带上。最后一台压力机上加工所得的零件，由机械手取出放入容器。

通用机械手由于动作较复杂，因此其速度往往跟不上压力机，自动线只能间歇同步。

以通用机械手连接的冲压自动线在生产上的应用推广，在很大程度上取决于机械手本身性能的改善。

3）夹板式往复送料冲压自动线。夹板式往复送料装置连接的冲压自动线，可由几台压力机组成，也可由少数多工位压力机串接成线。最前面的一台压力机，往往是双动压力机，以便完成拉深工序。第一台压力机的前端，是平片自动上料装置。真空吸盘下降吸片，提升后释放平片。夹板进给装置贯通全线，装在夹极上的卡爪接住平片，依次送给，在各个压力机上加工，并将成品送离自动线。



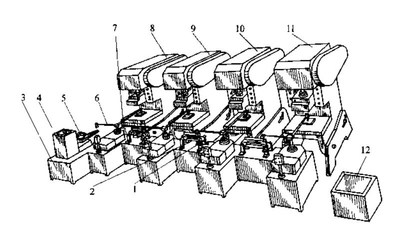


图 3.6-108 上件装置和通用机械手组成的冲压自动线
1—传送带驱动电动机；2—传送带；3—台架；4—贮件斗；5—定向分配机构；6—上件手臂；7—出件手臂；8～11—压力机；12—容器

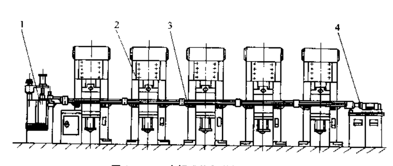


图 3.6-109 夹板式往复送料冲压自动线
1—平片上件装置；2—压力机；3—夹板；4—夹板驱动装置

图 3.6-109 为 5 台单动压力机组成的冲压自动线。自动线的前端为平片上件装置，后端为夹板驱动装置。

连接自动线的夹板式送料装置的动作，有双向和三向的。双向卡爪的动作，绝大多数是在水平面内进行"夹紧—送进—放松—退回"的循环。三向运动的进给装置较双向的增加了上下运动，结构更复杂，惯性大，但能简化冲模设计，也允许下模表面有凸起部分。

与机械手连接的冲压自动线一样，夹板式进给的冲压自动线的同步也有间歇同步和连续同步两种。只有在夹板式往复进给装置的循环时间，赶得上压力机的工作循环时，考虑在压力机驱动系统上采取措施，实现连续同步才有意义。具备这个先决条件的，往往是大型压力机。对于较小型的压力机，其工作循环快于夹板进给循环，压力机作单次运转，间歇同步。图 3.6-109 的自动线便是这样，其动作循环如图 3.6-110 所示。

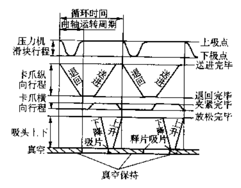


图 3.6-110 自动线动作循环

1.5 冲压生产线的输送机构

冲压生产线的输送机构是直接从模具中或通过出件装置把半成品冲压件向下道工序输送的机构。常用的输送机构见表 3.6-33。

2 冲压安全技术

冲压设备是一种运动比较简单，危险性却很大的设备。其危险在于工人长时间内机械地重复一个简单动作，大脑极易疲劳，工人动作形成固定模式，一旦发生异常情况，操作人员来不及反应而造成人身事故。事故统计结果表明，大部分事故发生在小吨位曲柄压力机上，受伤部位绝大部分在手上。仅仅依靠教育和规章制度要求操作人员集中精力，以此避免事故发生是有限的，冲压生产必须要配有安全装置和安全器具，避免由于安全装置不完善而发生事故。

冲压安全技术有两方面意义，一方面是保证操作者人身安全，另一方面是保证设备及模具安全。

安全生产是一个系统工程，涉及到生产现场环境的是否良好，如灯光、通风、环境色调是否良好等等；生产车间设备的布置是否有序，如原材料、半成品、废料的堆放是否整齐，设备之间的距离是否足够等等。本手册仅对冲压车间安全生产影响较大的冲压安全装置、冲模安全技术要求和冲压车间噪声消除予以介绍。

2.1 人身安全技术

操作者的手、臂、头等进入危险区，是冲压生产中产生人身安全事故的主要原因。为避免人身安全事故，必须制定和贯彻严格的规章制度，加强安全教育，并采取有效的安全



措施，有条件时应尽可能采用机械化自动化生产。

可采取的措施有：

1）扩大模具的安全操作空间，消除或减小危险区域；

2）防止人手进人危险区域；

3）以机械化自动化装置代替手工操作；

4）以手工具代替人手进人危险区域；

5）人手进人危险区域压力机停止动作；

6）加强压力机安全装置；

7）防止运输和安装事故；

8）降低噪声。

表 3.6-34 列出保障人身安全的技术措施。

表 3.6-33 常用输送机构

形式		简图	说明
流料槽			依靠重力或惯性力输送工件，结构简单，工作可靠
滚道			
输送带			可连续输送零件，需有装件、卸件机构 可根据需要调节输送速度和输送距离 常用于大、中型零件的输送
提升输送机	刮板式	1—输送带；2—刮板；3—导轮	可利用滑道使工件直接滑到输送带上被刮板带走，导轮速度和刮板间的距离均可调 制造成本低，适用范围广
	斗式	1—滑道；2—驱动轮；3—斗；4—胶带；5—接料槽	用于垂直提升工件，需要时可倾斜成65°~75°，工作速度一般在0.2~0.4 m/s 结构简单，制造、安装方便，通用性强
	链式	1—料斗；2—工件；3—螺旋凸轮；4—导槽；5—链轮；6—拨指；7—链条	常用于带头的杆类工件

续表 3.6-33

形式		简图	说明
梭动输送机		1—工件；2—送进爪；3—固定爪	该机送料距离、送进时间、送料位置较准确，可调整成与压力机工作节拍同步的间歇动作，送进的工件能以一定姿态进入模具
翻转机	取件翻转机		冲压后工件随上模上升，翻转机的两根托杆从工件下面伸入，接住被卸料装置从上模卸下的工件，迅速后退并将它翻转。也可利用下模中的顶杆将工件顶出，然后翻转机进行取件并翻转
	吸盘式翻转机	1—气缸；2—齿轮；3—翻转板；4—真空吸盘；5—传送带	工件被真空吸盘吸住，翻转板按箭头所指方向转动，工件翻转180°后落在输送机上被送往下工序
	板式翻转机	1—气缸；2—齿轮；3、4—翻转板；5—传送带	工件取出后放在翻转板3上，气缸带动两个翻转板运动，翻转板3上的工件被翻转180°后转移到翻转板4上。气缸反向动作使两块翻转板分开，板3回位准备接下一个工件，板4回位将工件放到输送机上

表 3.6-34 冲压安全技术措施

序号	防护原理	具体方法	
		简图	说明
1	消除或减少危险区域	>50　>50	从下模座上平面至上模座下平面或压力机滑块平面的最低位置应大于50 mm
		倒圆角	操作人员的双手容易碰着的外廓部分的尖角，予以倒棱或倒圆

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简　图	说　明
1	消除或减少危险区域		导板或刚性卸料板与凸模固定板之间距离一般不小于 20 mm
			减小上、下模接触面积
			模具上开出空槽，以便于安全操作及取料方便
			将模具上模座的正面做成斜面
2	拦阻双手进入危险区域		扇形网状固定式保护罩
			折叠式保护罩

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简图	说明
2	拦阻双手进入危险区域		锥形弹簧构成的保护罩
			固定在凹模上的防护罩，栅栏由开缝的金属板（或整块透明材料）制成
		1—压料板；2—防护板	活动压料板四周应设置防护板，防止手或异物误入底部
3	推拒双手退出危险区域		推手保护装置是采用杠杆摆动形式，借助于滑块向下运动而动作
			双推手装置
		1—齿条；2—齿轮；3—立柱；4—转板	转板护手与压力机滑块联动。当滑块下行时，装在上模板的齿条驱动齿轮作逆时针方向旋转、同时带动转板转到竖直位置，将手推出

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简　图	说　明
4	改变结构，手可在危险区外操作		利用斜面料槽将待冲工序件滑到冲模工作位置
			把定位件制作成可抽出的活动件
		凹模	将凹模制作成可抽出的活动凹模
		(a)　(b)	采用凸轮控制和斜面控制的挡料装置操纵机构

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简图	说明
5	机械化自动化装置代替手工操作		弹簧取件方法结构简单，可提高生产效率，适用于刚度较大而重量较小的冲件
		1—推杆；2—工件	单动压力机拉深模的气压推件装置。推杆1直接与气缸活塞连接，当压力机滑块回升时将工件2从模具上推出
		(a) (b) 1—上模；2—接件器；3—下模	连杆式接件装置。安装在上模1与下模3上的连杆由中间轴销铰接，并在此轴销上安装接件器2，滑块在上止点时（图a），接件器2伸入上下模间接住从上模打下的工件，滑块下行时，接件器退出，到下止点时（图b），接件器倾斜，工件落到盛器中
		1—接件器；2—拉杆；3—可调节拉杆	摇板式接件装置。接件器1固定在拉杆2上，拉杆2的一端铰接在压力机床身上，可以调节长度的拉杆3一端铰接在压力机滑块上，另一端又与接件器1铰接。滑块上下运动时，接件器作摆动。滑块上行时，接件器摆动到上下模间，接住工件。因为接件器是倾斜的，故工件可沿其表面滑落到盛器内

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简　图	说　明
5	机械化自动化装置代替手工操作	(a)接件状态 (b)模具闭合状态 1—上连杆；2—下连杆；3—接件板	缩放仪式接件装置可以由单个缩放仪或几个缩放仪组合起来。节数多则动作圆滑并可以将工件接出较远距离。设计时需注意不使机构与模具碰撞。这种机构适用于中小型工件的冲压
			大型缩放仪式接件装置用于大型工件 在动作过程中，接件器的倾斜度不变，接件器上有用长的滚柱组成的辊道，可使工件易于滑下
		(a)接件状态　(b)模具闭合状态 (c)齿轮齿条传动的滑道式接件装置	滑道式接件装置在上模上使用杠杆，在下模上使用滑道与滚柱。接件器的轨迹决定于滑道形状，是一种较好的方法 图c为齿轮齿条传动的滑道式接件装置，下模下降时接件器退出 结构复杂，但动作平稳，适用于大型冲模的接件
		1—凸轮；2—滚轮；3—支架；4—轴；5—接件器；6—扭转弹簧	回转式接件装置。凸轮1安装在压力机滑块上，作上下运动，支架3固定在压力机床身上 压力机滑块下降时，凸轮1推动滚轮2使轴4回转并带动接件器5退出模具工作区，压力机滑块上行时，由扭转弹簧6将接件器转入模具工作区接件



续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简　图	说　明
5	机械化自动化装置代替手工操作	行程	利用气缸的大型接件装置 对于汽车覆盖件等大型冲件，接件器笨重，用杠杆等形式接件困难，因此可利用气缸。应保证压力机行程与接件器动作协调，可用压力机回转限位开关通过电磁阀操纵气缸，也可用压力机滑块控制限位开关或直接控制空气分配阀 为保证安全，宜用木材或塑料做接件器
			翻转兼输出装置 用机械手从前工序压力机上取出工件，翻转并送入后工序压力机
			平片形工序件装入料槽后逐件自动送入
			工序件在危险区外装入转盘，然后逐次送入
			料斗中的工序件逐件自动定向送入
6	手工具代手进入危险区域		真空吸取器，主要用于扁平、光滑的坯料或工序件



续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简图	说明
6	手工具代手进入危险区域	(a) 钳口闭合吸取工件 钳口张开释放工件 (b) (c) 1—磁钢；2—释放手柄	磁钢吸取器，用于从冲模工作位置取出冲件、放置坯料
		(a) (b) (c) (d) (e)	各种类型钳子，可根据不同冲件特征选用
		(a) (b) (c) (d) (e)	常用的手工具，用于推、拉坯料或冲件，以及清除粘在冲模工作面上的冲件或废料
7	手进入危险区压力机停止动作	1—投光器；2—接受器；3—调节螺杆	光电保护装置。用于具有摩擦离合器及寸动刚性离合器的大、中、小型压力机

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简图	说明
7	手进入危险区压力机停止动作		手推式安全装置。送料时操作者的手将透明保护板推下，使电路断开，压力机不能起动。手退出后，保护板在弹簧作用下复位而将电路接通，压力机正常工作
		1—敏感元件；2—控制器；3—操作空间	电容式保护装置，其原理是由敏感元件构成一定电容的电容器，当操作者的手靠近或通过敏感元件送料时，电容器的电容量发生变化，使与其相连的振荡器的振幅减弱或停止振荡，通过放大器和继电器使压力机停止运动
		A放大 1—滑块；2—触点；3—气流；4—接受器；5—气射器；6—压缩空气	气幕保护装置。在危险区和操作者之间用气幕隔开。压缩空气由气射器上的数个小孔射向装在滑块上的接受器形成气幕，并使动合触点接通。当操作者的手或其他物品挡住气幕时，接受器靠自重断开触点，压力机的滑块停止运动
8	只有双手（几人多手）都离开危险区，压力机才起动	1、2—按钮；3—铁心；4—脚踏板；5—操纵杠杆	双按钮电磁铁安全装置。电磁铁的铁心3平时插在操纵杠杆5的销孔内，使踏脚板4无法踩下，只有用两手同时按压力机前面的两个按钮1、2，接通线路，产生吸力将铁心拉出后，踏脚板才允许踩下
9	防护罩落下，压力机才起动	1—门栅；2—杠杆；3—离合器拉杆；4—挡块；5—调节螺母；6—踏板拉杆	带门栅的杠杆，通过螺栓铰接在机身上，踩动踏脚板使拉杆向下带动门栅下降到安全位置时，才可能通过挡块及调节螺母带动离合器拉杆，使离合器结合并完成冲压工作

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简图	说明
10	防止压力机误动作	(a) 机械式踏脚板保护罩 (b) 电器式脚踏按钮保护罩	防止重物偶然落在踏脚板上而引起压力机滑块突然落下造成事故
		1—拉杆；2—滑块；3—锁扣； 4—凸轮；5—杠杆；6—连杆；7—挡块	机械式单程装置。踏板踩下时，拉杆1连同滑块2，锁扣3和连杆6一起下降，离合器接合。压力机滑块到达行程下止点时，凸轮4推开杠杆5，使得另一端推动锁扣3，锁扣脱开，此时，连杆6又被弹簧顶起，即使踏板继续踩住，而连接离合器的连杆6不会下降。只有踏板被释放，使锁扣回到原来位置，重又扣住挡块7时，再踩踏板，压力机滑块才能又下行一次
11	防止运输安装事故		大型模具必须装起重螺钉以利搬运和安装

续表 3.6-34

序号	防护原理	具体方法	
		简　图	说　明
12	降低冲压噪声		降低冲压力，例如采用斜刃口或阶梯凸模
			降低工件或废料落入容器时的撞击声，使工件或废料沿斜面滑下，斜面本身用塑料或其他减振材料制成
		1—隔音墙；2—吸声材料	用隔音墙控制噪声传播，同时隔音墙内壁应有良好的吸声材料，以降低压力机操作者周围的噪声。屋顶也应有吸声材料。 无人操作的自动压力机可用全封闭的隔音室，隔音室只开原料和工件的出入口

2.2 冲压模具的安全技术要求

为保证安全地进行冲压生产，除在设备上采取安全措施外，冲压模具的安全措施也具有重要作用。

模具的设计和制造，应满足下列安全技术要求。

1）模具结构应保证安全可靠，操作方便。

2）模具设计时就考虑采用机械化自动化装置。

3）建立模具登记卡，记录模具的安装、调整、使用说明；与之配套的安全装置的使用；维修情况等。

冲压模具的安全技术要求见表 3.6-35。

表 3.6-35　冲压模具安全技术要求

序号	简　图	模具结构的安全技术要求
1		模具外部不能有突出部分或尖角部分，凡与机能无关的一切锐角都要倒棱，以免划伤皮肤
2		将上模座的正面做成斜面，以增加安全操作空间



续表 3.6-35

序号	简　　图	模具结构的安全技术要求
3	>15 >15	在复合模中，为尽可能减少危险断面，应在卸料板与凹模之间作出凹槽或斜面，并尽量减小卸料板前后的宽度
4		为了操作安全与取件方便，在需要用镊子将制件放入定位板时，在凹模和弹性卸料板上均应开空手槽
5		在拉深模中，为取件方便，应在左方（面向冲模）开一缺口
6	溜槽	除使用各种专用的送料装置外，还可以采用溜槽、浮雕板等机构将单个毛坯送进凹模
7		采用弹性刮料板，以代替手卸下零件。刮料板适用于制件厚度大于 1.5 mm 者
8		如果必须用手将制件装入凹模，而且操作会对工人带来危险时，可将下模做成可拉出式的，以避免在危险区域中装卸制件
9	导板	在弯曲模和拉深模中，压料板与下模板之间的空间必须用导板或角钢封闭起来



续表 3.6-35

序号	简图	模具结构的安全技术要求
10	防护罩	为防止冲压时操作者的手误入危险区，可以在模具周围安装防护板或安全栅栏
11	导柱错开 大小导柱	上、下模装合易反的应将导柱错开，或采用大、小导柱
12	后面 操作面	单面冲裁时，凸模的“凸台”部分应位于后侧
13	15~20	在导板式落料模中，为避免压手，在卸料板和凸模固定板之间，应保持 15~20 mm 的距离
14	上模底 >50 底座 冲床滑块 >50 底座	从模具下模座上平面至上模座下平面或压力机滑块下平面的最小间距不得小于 50 mm
15	起重螺钉	为使模具搬移和安装方便，大型模具应有起重装置
16	防护套筒	可动部分容易因操作不慎而碰手或夹住，因弹簧飞出而造成危险，这些危险部分应保护起来，加上防护罩
17	防松螺母 (a) (b)	为防止顶件器因损坏而下落，应制成阶梯式结构（图 a），当由螺纹、铆接等方法制成时，应采用防松螺母等防护措施（图 b）



2.3 冲压生产中的噪声及其控制

噪声是一种危害身心健康的有害声音，其危害程度主要取决于噪声级、频率和在该噪声级下停留时间的长短。

在噪声环境中工作，会使人反应迟钝，精力难以集中，容易疲劳，因而工作容易失误，甚至发生人身和其他事故。

长时间暴露在噪声环境中，能引起神经衰弱、心动过速、心率不齐、高血压、头痛、耳鸣等多种疾病。

我国《工业企业噪声卫生标准》，见表 3.6-36。

（1）冲压生产中的噪声源

冲压生产中的噪声包括空载噪声和负载噪声，如图 3.6-111 所示。图中以冲裁工艺为例研究噪声源，因为冲裁工艺在冲压加工中产生的噪声最强。

表 3.6-36 《工业企业噪声卫生标准》

每个工作日接触噪声时间/h	允许噪声/dB	现有企业暂时达不到标准时允许噪声参照值/dB
8	85	90
4	88	93
2	91	96
1	94	99
最高不得超过	115	115

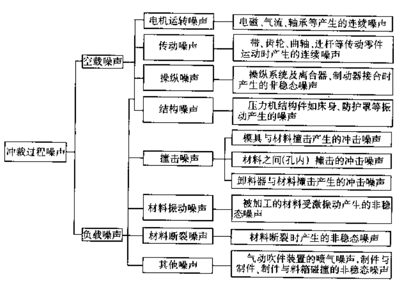


图 3.6-111 冲裁噪声源

（2）噪声的控制与消减

控制噪声一般采用以下基本方法：

1）消减声源噪声；

2）控制噪声的传播。

具体方法和措施见表 3.6-37。

表 3.6-37 消减声源噪声

			具体方法和措施
消减声源噪声	空载噪声的控制	1	提高传动零件的加工精度和配合精度
		2	V带传动代替齿轮传动
		3	减少齿轮传动的噪声
		4	摩擦离合器代替刚性离合器
		5	在气动摩擦离合器分配阀的排气口安装消声器
		6	做好高转速零件的动平衡
		7	安装具有与滑块同样惯性效果的平衡装置
		8	注意设备的维护，防止运动部件产生冲击而引起噪声
	负载噪声的控制	1	发展无噪声、小噪声的冲压设备
		2	提高压力机床身的抗震性能，减小冲压过程中设备构件振动的声辐射
		3	采用缓冲器延长压力机卸载阶段的时间，避免突然卸载
		4	加强设备、模具和材料的润滑
		5	厚钢板采用斜刃冲裁
		6	采用高阻尼合金材料制造卸料板，降低卸料板与板料撞击产生的噪声
		7	使用磁力吸盘、抓取装置等代替压缩空气喷嘴吹卸零件，消除喷嘴产生的强烈高频噪声
		8	降低送料装置、制件传输装置的噪声



续表 3.6-37

		具体方法和措施
控制噪声的传播	1	在压力机和混凝土基础之间放置隔振器
	2	在轴承和轴承座之间加弹性衬套
	3	采用局部隔声法
	4	采用全封闭的隔声室
	5	产生强噪声的去毛刺滚筒、振动光饰机等设备单独安装在密闭房间内
	6	车间按设备噪声的高低分区布置，并在分区边界安置吸声幕或隔声屏
	7	墙壁应使用良好的吸声材料，屋顶悬吊吸声板或吸声幕
	8	在设备的罩壳等金属结构上涂敷一层阻尼材料，以抑制结构振动

(3) 操作人员的个人防护

上述方法无法实现，或现场只需少数操作人员而噪声很大的情况下，可以对在噪声环境下工作的人员进行防护，最简单的方法就是佩戴个人防护用具。常用的防噪声用具有：耳塞、耳罩、防声棉、防声头盔等。防噪声用具的种类及防护效果见表 3.6-38。

表 3.6-38　常用防噪声用具及防护效果

种类	说明	质量/g	衰减值/dB
棉花	塞在耳内	1～5	5～10
棉花加蜡	塞在耳内	1～5	15～30
伞形耳塞	塑料或人造橡胶	1～5	15～35
柱形耳塞	乙烯套充蜡	3～5	20～35
耳罩	罩壳上衬海绵	250～300	15～35
防声头盔	头盔上衬海绵	1 500	30～50

编写：华　林（武汉理工大学）
赵云民（武汉理工大学）



参考文献

1 李硕本．冲压工艺理论与新技术．北京：机械工业出版社，2002
2 涂光祺．精冲技术．北京：机械工业出版社，1990
3 肖景容，姜奎华．冲压工艺学．北京：机械工业出版社，1990
4 杨合，鲜飞军．先进塑性成形加工技术发展中的几个重要基础问题．中国机械工程学会第三届全国青年学术会论文集．北京：机械工业出版社，1998
5 杨合．不均匀变形控制与精确塑性成形．国家自然科学基金委员会机械工程青年科学家论坛文集．国家自然科学基金委员会工程与材料科学部，深圳，2004
6 吴诗惇．冲压工艺及模具设计．西安：西北工业大学出版社，2002
7 王孝培．冲压设计资料．第 2 版．北京：机械工业出版社，2000
8 马泽恩．计算机辅助塑性成形．西安：西北工业大学出版社，1995
9 肖祥芷．冲压工艺与模具计算机辅助设计．北京：国防工业出版社，1996
10 李志刚等．模具计算机辅助设计．武汉：华中理工大学出版社，1990
11 王仲仁．特种塑性成形．北京：国防工业出版社，1997
12 海锦涛．塑性成形新思路．中国机械工程，2000，11（1）：180～182
13 夏巨谌．精密塑性成形工艺．北京：机械工业出版社，1999
14 周贤宾．塑性加工技术的发展—更精、更省、更净．中国机械工程，2003，14（1）：85～87
15 俞汉清，陈金德．金属塑性成形原理．北京：机械工业出版社，1999
16 赵军，李硕本，吕炎．板材冲压成形的智能化控制技术．塑性工程学报，1999，6（4）：10～22
17 中国机械工程学会锻压学会．锻压手册：第 2 卷，冲压．北京：机械工业出版社，2002
18 杨玉英．大型薄板成形技术．北京：国防工业出版社，1996
19 姜奎华．冲压工艺与模具设计．北京：机械工业出版社，1997
20 中国机械工程学会，中国模具设计大典编委会．中国模具设计大典：第 3 卷 冲压模具设计．南昌：江西科学出版社，2003
21 航空制造工程手册总编委会．飞机钣金工艺分册．北京：航空工业出版社，1992
22 卢险峰．冲压工艺模具学．北京：机械工业出版社，1998
23 崔令江．汽车覆盖件冲压成形技术．北京：机械工业出版社，2003
24 李尚健．金属塑性成形过程模拟．北京：机械工业出版社，1999
25 冲模设计手册编写组．冲模设计手册．北京：机械工业出版社，2000
26 周大隽．冲压技术数据手册．北京：机械工业出版社，1998
27 王炎山．锻压工艺标准应用手册．北京：机械工业出版社，1998
28 王新华，袁联富．冲模结构图册．北京：机械工业出版社，2003
29 现代冲压技术编委会．现代冲压技术．北京：国防工业出版社，1994
30 常荣福．飞机钣金零件制造技术．北京：国防工业出版社，1992
31 张仲元．特种冲压技术．西安：西北工业大学出版社，1994
32 杨合，孙志超，林艳，李明奇．管成形技术发展基础问题研究．塑性工程学报，2001，8（2）：83～85
33 郑可熤．实用冲压模具设计手册．北京：宇航出版社，1990
34 张钧．冷冲压模具设计与制造．西安：西北工业大学出版社，1993



第4篇

板型管轧制成形

主 编 张 杰 杨海波 施东成 陈南宁

编 写 张 杰 曹建国 施东成 徐能光 刘 炜
周 琳 孙克军 施元鼎 杨海波 陈南宁

审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会



金属材料通过铸造、轧制、拉拔、挤压等工艺，可以加工成不同断面形状和尺寸，有些是作为最终产品，有些则是需要进一步加工的毛坯材料，其品种规格已达数万种之多。根据形状特征的不同，它们可以分为三大类：板材、型材和管材。按材质，分为钢铁材料和非铁金属材料。其中，钢铁金属材料的轧制加工成形最具代表性，应用也最为广泛。本篇主要介绍钢铁材料的板材、型材（型钢）和管材（钢管）的轧制成形。

板材可以成块或剪切成定尺长度供应，而对于厚度较薄、长度较大的板材一般采用成卷的形式供应，也称为带材，一般将板材和带材合称为板带材。此外，还有异型断面钢板、变断面钢板等新的板带产品。工作发达国家板带材占钢材总产量的50%～60%以上，近年来，我国通过品种结构的优化，板带材所占比例已经提高到40%以上。板带材不仅作为成品钢材使用，而且也常用作制造弯曲型钢、焊接型钢和焊接钢管等的原料。

型材（含线材）在工业先进国家中一般占总钢材的30%～35%，我国在50%以上。型材的品种很多，按用途可分为常用型材（方钢、圆钢、扁钢、角钢、槽钢、工字钢）和专用型材（钢轨、钢桩、球扁钢、窗框钢等）；按断面形状可分为简单断面型材和复杂或异型断面型材。按生产方法又可分为轧制型材、弯曲型材和焊接型材。此外，用纵轧、横轧、斜轧或楔横轧等特殊加工方法，可以加工出各种周期断面或特殊断面钢材，如螺纹钢、竹节钢、犁铧钢、车轴、变断面轴、锚杆等。

管材一般约占钢材总产量的10%左右，我国大约为7%。其规格用外形尺寸（外径或边长）和内径及壁厚表示。在管材中，以圆形断面居多，但也有其他异型断面的管材。按用途分为轴送管道用钢管、锅炉管、地质钻探管、轴承钢管、注射针管等。按制造方法分为无缝钢管、焊接钢管及冷轧与冷拔钢管等。各种钢管的规格按直径与壁厚组合也非常多，其外径最小可以到0.1 mm，最大可至4 m，壁厚最薄可达0.01 mm，最厚可至100 mm。随着科学技术的不断发展，新的钢管品种也在不断出现。

第1章　板带轧制成形

1　板带材的特点及分类

1.1　产品特点

板带产品具有外形扁平、宽厚比大、单位体积的表面积大等特点，这种外形特点带来其使用上的特点：①表面积大，故包容覆盖能力强，在化工容器、建筑、金属制品、金属结构等方面都得到广泛应用；②可任意剪裁、弯曲、冲压、焊接，制成各种制品构件，使用灵活方便，在汽车、航空、造船及拖拉机制造等部门占有极其重要的地位；③可弯曲、焊接成各类复杂断面的型钢、钢管、大型工字钢、槽钢等结构件，故板带材称为“万能钢材”。

1.2　技术要求

对板带产品的技术要求具体体现为产品标准。板带产品的技术标准一般包括有品种规格标准、技术条件、试验标准及交货标准等。根据板带产品用途的不同，对其提出的技术要求也不一样，但主要可以归纳为以下四个方面。

1）尺寸精确度。板带产品的尺寸精确度主要是厚度精度和宽度精度，其中，厚度精度的控制难度很大。板带材由于宽度与厚度之比（简称宽厚比）很大，厚度一般很小，厚度的微小变化势必引起其使用性能和金属消耗的巨大波动。故在板带生产中需要精确控制厚度，尽量按负公差轧制，以节省金属。

2）板形。板形包括三个方面，一是整体上有无浪形和翘曲，称平坦度要好；二是横截面的形状均匀（横向厚差小），即凸度、楔形、边降（边部减薄）、局部高点等要小；三是平面形状规整。其中，平坦度是最主要的。所以，通常所说的板形指的就是平坦度。

用户需要整体平坦、形状规整、凸度和楔形等均较小的产品。例如，对普通中厚板，其每1 m长度上的翘曲高度不得大于15 mm，优质板不大于10 mm，对普通薄板原则上不大于20 mm。由于板带材既宽又薄，对不均匀变形十分敏感，板带越薄，其对不均匀变形的敏感性越大，保持良好板形也就越困难。

3）表面质量。板带是单位体积的表面积最大的一种钢材，又多用作外围构件，故必须保证表面的质量。无论是厚板或薄板表面，皆不得有气泡、结疤、拉裂、划伤、折叠、裂缝、锈蚀、压印、夹杂和压入氧化铁皮等缺陷，因为这些缺陷不仅损害板制件的外观，而且往往破坏性能或成为产生破裂和锈蚀的策源地，或成为造成应力集中的薄弱环节。例如，硅钢板表面的氧化铁皮和表面的粗糙度就直接影响电磁性能；深冲钢板表面的氧化铁皮会使冲压件表面粗糙甚至开裂，并加快冲压模具的磨损。对不锈钢板等特殊用途的板带材，还有特殊的技术要求。

4）性能。板带材的性能要求主要包括力学性能、工艺性能和某些钢板的特殊物理或化学性能。一般结构钢板只要求具备较好的工艺性能，例如，冷弯和焊接性能等，而对力学性能的要求不很严格。对多数钢板，则要保证力学性能，要求有一定的强度和塑性。对于重要用途的结构钢板，则要求有较好的综合性能，即除了具有良好的工艺性能、力学性能外，还要求一定的化学成分，以保证良好的焊接性能、常温或低温冲击韧性或一定的冲压性能、一定的晶粒组织及各方向组织均匀性等。诸如造船板、桥梁板、锅炉板、高压容器板、汽车板、低合金结构板以及优质碳素钢等都属于这一类。例如，一般锅炉钢板除要求具有一定的强度、塑性和冲击韧性以外，还要求具有一定的化学成分和均匀细小的结晶组织，含碳量要严格限制在0.3%（质量分数，下同）以下，否则将使工件在焊接后的高速冷却中，发生淬硬而影响焊缝的强度。磷会降低冲击韧性并引起冷脆，故其含量不允许超过0.04%；硫促使钢板热脆，含量须限制在0.045%以下。为了避免锅炉钢板在工作中发生时效陈化现象，还必须进行时效敏感性的试验，并为此要极力降低氧和氮的含量，以减小时效陈化的危害。又如造船和桥梁钢板，除了必须具备良好的工艺性能和常温力学性能以外，还要求有在－40℃温度下，具有一定的低温冲击韧性。

除了上述的各种结构钢板以外，还有各种特殊用途的钢板，例如，高温合金板、不锈钢板、硅钢板、复合板等。它们或要求特殊的高温性能、低温性能、耐酸耐碱耐腐蚀性能，或要求一定的物理性能（如电磁性能等）及其他特殊性能。

板带的外形特点（宽厚比很大）和主要技术要求决定着生产的特点。

1）板带是采用近似圆柱体的轧辊（没有孔型）轧制，故改变产品规格较简单容易，调整操作方便，易于实现计算

机控制的自动化生产。

2）板带的形状简单，可成卷生产，且在国民经济中用量最大，故需要而且能够实现高速度的连轧生产。

3）由于宽厚比和表面积都很大，故生产中轧制力很大，可达数百甚至数千吨，这不仅使轧制设备（轧机）庞大，而且使产品的厚、宽尺寸精度和板形的控制技术及表面质量控制技术变得十分困难和复杂。

1.3 产品分类

1）按厚度分类。板带材品种规格繁多，按产品尺寸规格一般可分为中厚板（包括特厚板）、薄板和极薄带材（箔材）三类。我国一般称厚度在 4.0 mm 以上者为中厚板（其中 4～20 mm 者为中板，20～60 mm 者为厚板，60 mm 以上者为特厚板），4.0 mm～0.2 mm 者为薄板，而 0.2 mm 以下者为极薄板或箔材。目前箔材最薄可达 0.001 mm，而特厚板可厚至 500 mm 以上，最宽可达 5 000 mm。板带材的这种分类虽然也是基于各类产品相似的技术要求和生产工艺与设备特点，但实际上各国习惯并不一样，其间也无固定的明显界限，如日本规定 3～6 mm 为中板，6 mm 以上为厚板。不同国家的工业标准对板带、薄板和中厚板的定义有所不同。

① 板带。日本的工业标准 JIS G3193 只把板带简单地定义为以板卷形式供货的轧制产品。英国的标准 BS1449（Ⅰ）对板带的定义与日本标准相似。

② 薄板和中厚板。德国标准 DIN1016 把薄板和中厚板定义为"一种边缘没有特定要求的平板产品，它通常具有正方形或长方形的形状，它的边部可以是轧制表面（即有轻微的弯曲）或以机械的方式切除。"薄板的特征是它的厚度小于 3 mm，而中厚板厚度大于或者等于 3 mm。根据日本的工业标准 JIS G3193，薄板和厚板的定义是："以平板的形状供货的钢材，包括从板带上切下来的平板，但不包括用于再轧制的钢件和扁钢。"英国标准 BS 1449（Ⅰ）对薄板和厚板的定义与日本标准相似。

根据国际标准 ISO 3574，冷轧薄板定义为："厚度0.36 mm 及其以上（最厚可达 4 mm），宽度 60 mm 及其以上，以成卷或剪切成矩形断面的形式生产的扁平材"。

2）按性能分类。由美国钢铁协会（ISS）出版的钢铁产品钢铁手册中有关薄板部分，列举了热轧碳钢产品的四种质量级别。

① 普通钢（CQ）。普通钢的原料是沸腾钢或者半镇静钢。这种钢的化学成分与力学性能有低度的不均匀性。这种钢的硫和磷含量分别限制在 0.035% 和 0.040% 以下。

② 深冲钢（DQ）。深冲钢采用的是特殊的原材料，并且要求准确地进行生产操作控制。这种钢的硫和磷的含量分别限制在 0.025% 和 0.035% 以下。

③ 深冲镇静钢（DQSK）。深冲镇静钢采用的也是特殊的原材料，并且要求准确地进行生产操作控制。当对产品有特殊要求时，例如要求能够减小冲压时各道冲压间时效的不利影响时，使用这个等级的钢。

④ 结构钢（SQ）。结构钢通常根据屈服强度、抗拉强度等力学性能进行生产。生产者通过对这种钢的化学成分，特别是对碳、锰、磷和氮的含量进行调整，以满足用户对钢的力学性能方面的要求。

3）按用途分类。板带产品按用途又可分为造船板、钢炉板、桥梁板、压力容器板、汽车板、镀层板（镀锡、镀锌板等）、电工钢板、屋面板、深冲板、焊管板、复合板及不锈、耐酸耐热等特殊用途钢板等。

4）合金钢板带的分类。合金钢板带通常根据具体应用进行分类，如航空用钢、航空结构钢、汽车结构钢、轴承钢、锯条钢等。

2 板带轧制参数及产品几何参数

2.1 轧制过程基本参数

1）简单轧制过程。在一般的轧制过程中，轧件只是在一对工作辊中受到压力而产生塑性变形。为了便于研究，一般都从简单的（或理想的）轧制过程入手。简单轧制过程的特征是：①两个轧辊都驱动；②两个轧辊直径相等；③两个轧辊的转速相同；④被轧金属作等速运动；⑤被轧金属除由轧辊施加的力外，无其他作用力；⑥被轧金属的力学性能是均匀的。

轧件在轧制过程中，直接与轧辊相接触而发生变形的区域叫做变形区，而与轧件接触的轧辊称工作辊，见图 4.1-1。

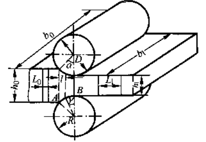


图 4.1-1 变形区几何形状

图中，D、R 为轧辊直径、半径；h_0、h_1 为轧制前、后轧件高度（厚度）；h_m 为轧制前、后轧件的平均高度，$h_m=(h_0+h_1)/2$；Δh 为压下量（绝对压下量），$\Delta h=h_0-h_1$；b_0、b_1 为轧制前、后轧件宽度；Δb 为宽展量（绝对宽展量），$\Delta b=b_1-b_0$；L_0、L_1 为轧制前、后轧件长度；α 为咬入角（变形区所对应的轧辊中心角），$\cos\alpha=1-\Delta h/D$；$\widehat{AB}$为咬入弧或接触弧；l 为接触弧水平投影长度，可近似认为 $l=\sqrt{R\Delta h}$；γ 为临界角（中性角）。

2）轧制过程变形参数。轧制时，轧件发生塑性变形，尺寸在三个方向都发生变化，即轧件高度由 h_0 减小到 h_1，比值 $h_1/h_0=\eta$，为轧件高度方向的相对变形，η 叫做压下系数；轧件宽度由 b_0 增加到 b_1，比值 $b_1/b_0=\beta$，为轧件宽度方向的相对变形，β 叫做宽展系数；轧件长度由 L_0 增加到 L_1，比值 $L_1/L_0=\lambda$，为轧件长度方向的相对变形，λ 叫做伸长系数，伸长系数总是大于1。如轧制 n 个道次，则总伸长系数为各道次伸长系数的乘积或对数和。在忽略体积变化，即假设轧制前后轧件的体积不变，即有：

$$h_0 b_0 L_0 = h_1 b_1 L_1 \qquad (4.1\text{-}1)$$

该式亦可写作：

$$\frac{h_1}{h_0}\times\frac{b_1}{b_0}\times\frac{L_1}{L_0}=1 \qquad (4.1\text{-}2)$$

得压下系数 η、宽展系数 β 和伸长系数 λ 之间的关系：

$$\eta\beta\lambda=1 \qquad (4.1\text{-}3)$$

3）绝对压下量和相对压下量。轧制时，以绝对压下量表示轧件高度方向的变形，即轧制前后轧件高度的差值：

$$\Delta h=h_0-h_1 \qquad (4.1\text{-}4)$$

绝对压下量与轧件原始高度之比称作相对压下量或相对变形程度，简称相对变形，用 ε 表示：

$$\varepsilon=\frac{\Delta h}{h_0}=\frac{h_0-h_1}{h_0}=1-\eta \qquad (4.1\text{-}5)$$

若无宽展时，有 $\beta=1$，由式（4.1-3），则得到伸长系数 λ 与相对变形 ε 的关系：

$$\lambda=\frac{1}{1-\varepsilon} \qquad (4.1\text{-}6)$$

在变形区内，轧件的变形沿接触弧逐渐变化，所以，任意断面上的相对变形也是变化的。因此，用相对变形程度 ε 不能很好地反映变形区内的实际变形程度。故有时需要计算平均变形程度。平均变形程度简称平均变形，用 ε_m 表示，若设接触弧为抛物线，它与相对变形程度之间的关系为：

$$\varepsilon_m = \frac{2}{3}\varepsilon \tag{4.1-7}$$

因相对变形 ε 和平均变形 ε_m 均不能确切表示轧件在某变形瞬间的真实变形程度，因此在一些场合，需要采用真实变形程度。真实变形程度用 r 表示，其意义是：在变形过程中，轧件的原始高度 h_0 经过无穷多个中间数值逐渐变到 h_1，则由 h_0 到 h_1 的终了变形程度可以看作是各阶段相对变形的总和，它与相对变形程度 ε 的关系是：

$$r = \ln\frac{h_0}{h_1} = -\ln(1-\varepsilon) = \varepsilon + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{\varepsilon^3}{3} + \cdots + \frac{\varepsilon^n}{n} + \cdots \tag{4.1-8}$$

真实平均变形程度可表示为：

$$r_m = -\ln(1-\varepsilon_m) \tag{4.1-9}$$

4）前滑和后滑。一般的轧制条件下，在轧制区内，轧辊的圆周速度和轧件的速度并不是处处相等的。在出口处，轧件的速度比轧辊的圆周速度大，轧件与轧辊间出现相对滑动，称为前滑；在入口处，轧件的速度比轧辊圆周速度低，轧件与轧辊间也出现相对滑动，但与出口处相对滑动的方向相反，称为后滑。

由于存在前滑和后滑，在变形区中必然存在着一点，该点上的金属移动速度与轧辊圆周速度相等。该点称为中性点（中和点或临界点）。过此点具有相同条件的断面称为中性面（中和面或临界面）。中性点到轧辊中心之连线与两辊中心连线之夹角 γ，称中性角（或临界角）。中性角可以根据变形区内速度关系及力的平衡条件确定：

$$\gamma = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\Delta h}{R}}\left[1-\frac{1}{2\mu}\left(\sqrt{\frac{\Delta h}{R}}-\frac{T_1-T_0}{P}\right)\right] \tag{4.1-10}$$

无张力时

$$\gamma = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\Delta h}{R}}\left[1-\frac{1}{2\mu}\sqrt{\frac{\Delta h}{R}}\right] \tag{4.1-11}$$

式中，μ 为轧件与轧辊之间的摩擦系数；T_1、T_0 为轧件受到的前、后张力（出口处为前张力，入口处为后张力）。

这样，轧件的变形区就被中性面分成了两个区，如图4.1-2所示，靠近出口的Ⅱ区称为前滑区，靠近入口的Ⅰ区称为后滑区。

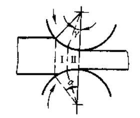


图4.1-2 前滑区及后滑区

轧件出口速度与轧辊圆周速度之间的差异用前滑值 S 来表示，即：

$$S = \frac{v_1 - v_r}{v_r}\times 100\% \tag{4.1-12}$$

式中，v_1 为轧件出口速度；v_γ 为轧辊的圆周线速度。

前滑值也可用德列斯登（Drasden）公式计算：

$$S = \frac{\Delta h}{4h_1}\left(1-\frac{1}{2\mu}\sqrt{\frac{\Delta h}{R}}\right)^2 \tag{4.1-13}$$

实际生产中，前滑值通常为3%～6%，单机架轧制可以不考虑。但在连轧生产中，为了使轧制能正常进行，必须保证连轧关系，即轧件通过各架轧机时的金属秒流量相等。在计算秒流量时，必须考虑到前滑值，即：

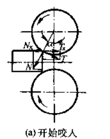
$$F_1 v_{r1}(1+S_1) = F_2 v_{r2}(1+S_2) = \cdots = 常数$$

式中，F_1、F_2、…为各架轧机出口处轧件的断面积；v_{r1}、v_{r2}…为各架轧机轧辊圆周线速度；S_1、S_2、…为各架轧机轧制时的前滑值。

5）变形速度。在分析轧制过程时，不仅要考虑变形的大小，还要考虑变形速度。变形速度定义为单位时间内的相对变形程度大小，即相对变形程度对时间的导数，以 u 表示。为了全面评价变形区内的变形速度，一般需要计算平均变形速度 u_m。由于轧制条件和变形区内的轧辊与轧件之间的摩擦条件不同，平均变形速度的计算方法亦不同，一般按下面方法计算：

$$u_m = \begin{cases} \dfrac{v_1}{l}\times\dfrac{\Delta h}{h_0} & \left(\dfrac{l}{h_m} > 2\text{时}\right) \\ \dfrac{v_r}{l}\ln\dfrac{h_0}{h_1} & \left(\dfrac{l}{h_m} \leqslant 2\text{时}\right) \end{cases} \tag{4.1-14}$$

6）咬入条件。只有轧件被轧辊咬入进入变形区，轧制过程才能建立。轧件咬入条件，可分为两个阶段，即开始咬入阶段和已经咬入阶段，见图4.1-3。



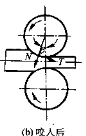


图4.1-3 开始咬入及咬入后作用于轧件上的力

① 开始咬入阶段。当轧件与旋转着的轧辊接触时，轧辊对轧件作用有正压力 N 及摩擦力 T，如图4.1-3a所示。这两个力的水平分量分别为 $N_x = N\sin\alpha$，$T_x = \mu N\cos\alpha$，α 为咬入角，μ 为摩擦系数。在力平衡状态下，并考虑上下辊，有：

$$N_x - T_x = 0$$

即：

$$2N\sin\alpha - 2\mu N\cos\alpha = 0$$

则有：

$$\mu = \tan\alpha \tag{4.1-15}$$

若要使轧件能被自然咬入，必须 $T_x > N_x$，即 $\mu > \tan\alpha$。因此，只有当 $\mu > \tan\alpha$ 时，才能实现轧件的自然咬入；当 $\mu < \tan\alpha$ 时，则不可能自然咬入，这时需要提高轧件与轧辊之间的摩擦系数或减小咬入角。前者可以通过增加轧辊表面粗糙度实现；后者可以通过增大轧辊直径 D 和减小压下量 Δh 来实现。

② 已经咬入阶段。由图4.1-3b可知，当轧件被咬入后，若继续咬入，则必须符合以下条件，即

$$\mu > \tan\beta$$

由于 $\beta < \alpha$，所以 $\tan\beta < \tan\alpha$。这说明了轧件一旦咬入，就会继续咬入，轧制过程就能建立起来。

2.2 轧制过程的塑性变形

1）弹性与塑性变形。物体在外力或内力作用下可以相继产生弹性变形和塑性变形，只有当物体已有弹性变形时，塑性变形才会发生，即塑性变形过程中一定有弹性变形存在。轧制过程是一个大变形过程，其中的塑性变形一般远远

大于弹性变形。为了简化问题，分析时，往往忽略弹性变形过程。塑性变形理论是金属压力加工（轧制是压力加工方式之一）的基础理论。

金属轧制是轧件在轧辊之间连续的塑性变形过程。通过塑性变形来获得一定形状与尺寸的轧制成品。轧制变形具有变形量大、变形速度快等特点。

2）金属塑性变形条件——塑性方程式。塑性体受到外力作用后，首先发生弹性变形，当外力继续增加到某一极限时，开始由弹性变形过渡到塑性变形，随着外力的继续加大，塑性变形也继续增加。塑性条件就是材料由弹性状态进入塑性状态的条件，一般以金属在塑性变形时，外力作用引起的各向应力值与其塑性变形阻力之间的关系来表述。关于这种关系，塑性力学中有许多不同的理论。

H.Tresca（屈雷斯卡）的最大切应力理论认为，欲使处于应力状态的物体的某一点进入塑性状态，必须使该点的最大切应力达到材料所允许的极限值，并且该极限数值为与应力状态无关的常数。

R.Von.Mises（米赛斯）的形状变化位能理论认为，欲使处于应力状态的物体的某一点进入塑性状态，必须使该点的弹性形状变化位能达到材料所允许的极限值，并且该极限数值为与应力状态无关的常数。

在轧制过程中，形状变化位能理论得到了广泛采用。根据该理论，得到了普遍情况下，物体由弹性变形过渡到塑性变形的条件，通常称之为塑性方程式：

$$[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]=2\sigma^2 \qquad (4.1\text{-}16)$$

式中，σ_1、σ_2、σ_3 为三个主变形方向的三个主应力；σ 为金属塑性变形阻力，它只决定于材料种类及变形条件，与应力状态无关。

为了应用方便，塑性方程式可以简化为：

$$\sigma_1-\sigma_3=\beta\sigma \qquad (4.1\text{-}17)$$

式中，β 为中间主应力 σ_2 的影响系数，$\beta=1\sim1.155$，根带轧制时，取 $\beta=1\sim1.15$。

令 $k=\beta\sigma$，塑性方程式也可写作：

$$\sigma_1-\sigma_3=k \qquad (4.1\text{-}18)$$

3）金属塑性变形阻力。金属塑性变形阻力是指单向应力状态条件下金属材料产生塑性变形时所需的单位面积上的力。它的大小取决于金属材料的化学成分和组织状态、变形温度、变形速度、变形程度及加工历史。金属塑性变形阻力又称真正应力（流动应力、变形抗力），一般用 σ 或 σ_s 表示。

目前，变形阻力数据主要是通过实验取得，实验结果或做成曲线图表，或整理成公式，后者更便于应用。

2.3 轧制压力与轧制力矩

1）变形区内的应力状态　在轧制过程中，金属在轧辊间承受轧制压力的作用面发生塑性变形。由于金属变形时体积不变，变形区的金属在垂直方向产生压缩，在轧制方向产生伸长，在横向产生宽展，面伸长和宽展受到接触面上摩擦力的限制，使变形区内的金属呈三向压应力状态。

变形区内的应力分布是不均匀的。在有前后张力轧制时，变形区中部呈三向压应力状态；靠近入口和出口处，因张力的作用，金属呈一向拉应力和两向压应力状态，如图4.1-4所示。对变形区内应力状态起主要作用的是作用在接触弧上的正压力和摩擦力，包括它们的大小和分布。

2）接触弧上的单位压力微分方程　理论与实验表明，在轧件与轧辊的接触区内，单位接触压力（简称单位压力）呈不均匀分布，分布形态与轧辊直径、轧件高度（厚度）、

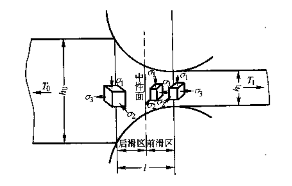


图 4.1-4　轧制时变形区内的应力状态

摩擦、张力等因素有关。基于不同的假设，卡尔曼（T.Karman）和奥罗万（E.Orowan）分别给出了不同的单位压力微分方程，在此方程的基础上，可以推导出单位压力的计算公式。

3）轧制压力　轧制总压力，简称轧制压力或轧制力，是作用于轧件并使轧件产生塑性变形的合力。轧制力与轧制方向基本垂直。轧制力的确定主要采用以下三种方法。

① 实测法　在轧机上放置专门设计的压力传感器，直接测量作用于轧辊上总压力的垂直分量。

② 经验公式计算法　根据大量实测资料，采用统计的方法，归纳成能够反映一些主要影响因素的经验计算公式。

③ 理论计算法　根据塑性力学原理，分析变形区内应力状态与变形规律，确定轧辊与轧件接触弧上的单位压力分布规律和大小，计算在整个接触面积上的压力和摩擦力在垂直方向上的投影总和，即是轧制总压力。

实际应用中，多采用理论计算与实验相结合的方法确定轧制压力。

由于单位压力在接触弧上的分布是不均匀的，为了便于计算，一般以单位压力的平均值平均单位压力来计算轧制总压力 P：

$$P=p_mF \qquad (4.1\text{-}19)$$

式中，p_m 为平均单位压力；F 为轧件与轧辊接触面的投影面积。

4）平均单位压力。影响单位压力的因素即是影响平均单位压力的因素，它们可以分为两大类：①影响轧制金属本身性能的因素，即金属塑性变形阻力 σ；②影响应力状态的因素，如轧辊与轧件之间的摩擦、变形区的形状和大小、外张力等。

目前的理论还不能给出平均单位压力与各因素之间准确的解析关系，为此，一般采用以下两个步骤来解决这个问题：

① 进行不同条件下的金属变形实验，以确定材料的变形阻力。实验可以是非轧制实验（如拉伸、压缩和扭转实验等），也可以是在实验室进行的小规模轧制实验，或者是在生产现场进行的实际轧制实验。

② 针对具体的轧制条件，确定平均单位压力 p_m 与塑性变形阻力 σ 之间的关系。

实际轧制轧过程中，材料的变件条件与过程与实验中的条件和过程（如温度、变形速度、摩擦等）有很大的不同，因此，建立平均单位压力 p_m 与塑性变形阻力 σ 之间的关系十分复杂和困难，难以给出统一的计算公式。因此，研究者基于卡尔曼或奥罗万的单位压力微分方程，针对不同的情况，采用不同的假设或简化（主要是接触弧曲线以及摩擦力的大小和分布），提出了许多不同的平均单位压力计算方法，如：А.И.Целиков（采利柯夫）方法、R.B.Sims（西姆斯）方法、M.D.Stone（斯通）方法和 S.Ekelund（艾克隆德）、

Golovin Tiagonov（戈洛文－泰戈诺夫）方法、Goleji（盖勒吉）方法、亚历山大－福特方法、Denton－Crane（丹顿－克兰）方法、格林－华莱士方法、横井（Yokoi）方法、西贝尔方法、Ride（瑞德）方法、Sehultz－Smith（舒尔茨－史密斯）方法、Syke（赛克）方法、Ginzburg（金兹伯格）方法等。

比较典型的平均单位压力公式为：

$$p_m = n_\sigma k = n'_\sigma n''_\sigma n'''_\sigma k = n'_\sigma n''_\sigma n'''_\sigma \beta\sigma \qquad (4.1\text{-}20)$$

式中，n_σ 为影响系数；n'_σ 为摩擦影响系数，反映摩擦对应力状态的影响；n''_σ 为外区影响系数，反映外区对应力状态的影响；n'''_σ 为张力影响系数，反映张力对应力状态的影响。

在多数情况下，摩擦对应力状态的影响是主要的，而大部分计算平均单位压力的理论公式主要是针对摩擦影响系数 n'_σ 的计算。

根据不同的轧制情况，如热轧、冷轧、轧件厚度等，需要采用不同的平均单位压力计算方法。例如：热轧可采用采利柯夫方法与西姆斯方法；冷轧常采用斯通方法，亦可采用考虑张力影响后的采利柯夫方法；型钢轧制一般采用艾克隆德方法。

5）轧件与轧辊的接触面积　轧辊与轧件的接触面是一空间曲面，其面积 F 用下式计算：

$$F = \frac{b_0 + b_1}{2} l$$

式中，b_0、b_1 为轧制前后轧件的宽度；l 为接触弧的投影长度，简称接触弧长。

由于轧件的宽度一般是已知的，所以，接触面积的计算实际上是接触弧长的计算。考虑到轧辊的弹性压扁对接触面积的影响，接触弧长的计算分为两种情况：

① 不考虑轧辊弹性压扁。对于中厚板、板坯、方坯及异型断面轧件的轧制，一般不考虑轧辊弹性压扁的影响。当两个轧辊直径相同时，接触弧长为：

$$l = R\sin\alpha \approx \sqrt{R\Delta h} \qquad (4.1\text{-}21)$$

式中，R 为轧辊半径；Δh 为压下量。

在不考虑宽展的情况下，轧制力可按下式计算：

$$P = P_m b\sqrt{R\Delta h} \qquad (4.1\text{-}22)$$

式中，b 为轧件的宽度。

当两个轧辊半径不相同时，接触弧长度的水平投影为：

$$l = \sqrt{\frac{2R_1 R_2}{R_1 + R_2}\Delta h} \qquad (4.1\text{-}23)$$

式中，R_1、R_2 为两个轧辊的半径。

② 考虑轧辊弹性压扁。对于冷、热薄板的轧制，由于单位压力较高，轧辊会产生较大的局部弹性压缩变形，它使得接触弧的长度有显著的增加，见图 4.1-5。

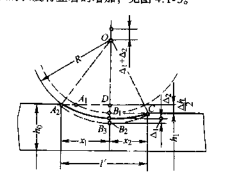


图 4.1-5　轧辊弹性压扁后接触弧的变化

压扁后的接触弧长可根据两个圆柱体弹性压扁公式推得：

$$l' = Cp'_m R + \sqrt{R\Delta h + (Cp'_m R)^2} \qquad (4.1\text{-}24)$$

式中，p'_m 为考虑轧辊压扁后的平均单位压力，它与 l' 有关，MPa；C 为系数，$C = \frac{8(1-\gamma^2)}{\pi E}$，对钢轧辊弹性模数 $E = 2.1\times10^5$ MPa，泊桑比 $\gamma = 0.3$，则 $C = 1.1\times10^{-5}$ 1/MPa。

式（4.1-24）亦可写成：

$$l' = \left[\frac{Cp'_m R}{\sqrt{R\Delta h}} + \sqrt{1 + \left(\frac{Cp'_m R}{\sqrt{R\Delta h}}\right)^2}\right]\sqrt{R\Delta h} = ql \qquad (4.1\text{-}25)$$

式中，l 为不考虑压扁时的接触弧长；q 为压扁系数。

$$q = Cp'_m\sqrt{\frac{R}{\Delta h}} + \sqrt{1 + \left(Cp'_m\sqrt{\frac{R}{\Delta h}}\right)^2}$$

在热轧薄板时，压扁系数 q 可简化为：

$$q = 1 + 1.15\times10^{-5} p'_m\sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \qquad (4.1\text{-}26)$$

在冷轧薄板时，压扁系数 q 可简化为：

$$q = 1 + 1.33\times10^{-5} p'_m\sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \qquad (4.1\text{-}27)$$

6）轧制力矩。使轧件产生变形的纯力矩等于驱动而个轧辊的总力矩。当两个轧辊直径相同时，总轧制力矩为：

$$M = 2Pa$$

式中，a 为力臂。

通常用接触弧长表示力臂：

$$a = ml$$

式中，m 为力臂系数；l 为接触弧长。

力臂系数的准确确定比较困难，一般热轧可以取 $m = 0.5$，冷轧取 $m = 0.35 \sim 0.45$。这样，总轧制力矩可写成：

$$M = 2Pml \qquad (4.1\text{-}28)$$

2.4　板带的几何参数

板带产品的几何形状主要包括横截而形状、平坦度和平而形状等三个方而。这三个方面相互关联，故可以统一称作板形。但习惯上，板形指的主要是平坦度，而横截面形状一般用凸度和楔形等表示。

（1）横截面形状

板带的横截面形状（Profile）根据下一步工序要求及产品用途的不同而有不同的要求。例如，直接面对用户的板带材，无论是以定尺交货或以板卷交货，一般希望板带的横截面形状接近矩形，因为用户希望得到没有厚度差的产品；而对于一些下工序，如需要冷轧的热轧板卷，为了冷轧时的稳定，希望横截面呈中间厚、两边薄的形状，即板带应具有一定的凸度。

轧件通过上下轧辊之间的辊缝（Roll Gap）时产生了塑性变形。在忽略了出辊缝后轧件的弹性恢复情况下，辊缝形状即是出口板带的横截面形状。面辊缝形状受轧制力引起的轧辊弯曲、弯辊机构引起的轧辊弯曲、轧辊的压扁、轧辊的初始辊形、轧辊的热变形、轧辊的磨损、氧化皮粘辊等因素的影响，辊缝形状会出现各种变化，板带的横截面形状一般是很不规则的。图 4.1-6 给出了实际生产中热轧和冷轧薄板的横截而形状实例。

板带的横截面形状虽然很不规则，但基本可分为一个中心区和两个边降（边部减薄）区，见图 4.1-7。中心区的横截面形状曲线一般用多项式表示：

$$h(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \cdots$$

式中，x 为以板带中心为零点的坐标；a_0、a_1、$a_2\cdots$ 为系数。

其中，一次项实际为楔形的反映，二次项（抛物线）反映了凸度，对于宽而薄的薄板，可能存在三次及三次以上的

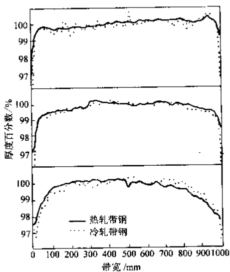


图 4.1-6 板带横截面形状实例

项。边部减薄区可以用与中心区不同的多项式表示。对于实际的板带，通过曲线回归的方法，可以将不规则的横截面形状表示为平滑的轮廓曲线，以便准确计算下面的截面参数。

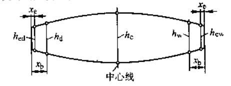


图 4.1-7 板截面形状参数定义

截面形状通常采用以下参数来表示：

1) 中心厚度 h_c：轧件中心线处的厚度，一般当作板带产品的名义厚度值。

2) 边部厚度 h_d 和 h_w：在距离板带边缘 x_b 处选择两个标志点，标志点以内为中心区，标志点以外为边降区，或称边部减薄区，标志点处的厚度值称作边部厚度。x_b 实际就是边降区的大小。边降区的大小与轧件的规格、轧机及轧制工艺等因素有关，目前没有统一的规定，一般为 25 ~ 100 mm，常用的是 40 mm 或 50 mm。

3) 边缘厚度 h_{ed} 和 h_{ew}：接近轧件边缘（距离为 x_e）的厚度值，x_e 一般为 5 ~ 10 mm。

4) 凸度 CR：板带中心区的形状一般认为接近抛物线形，或凸或凹，故可以用简单地用"凸度"来表示，它是中心厚度 h_c 和两个边部厚度平均值之差，即 $CR = h_c - \frac{(h_d + h_w)}{2}$；图 4.1-7 的板带凸度为正，负凸度的横截面为中间比两边薄。

5) 楔形 W：横截面呈现一边比另一边厚或薄时，用两个边部厚度的差值 $W = h_d - h_w$ 或 $W = h_w - h_d$ 来表示这种楔形形状。

6) 边降 ED_d 和 ED_w：在接近板带边部时，厚度会出现急剧减小，用边部厚度与边缘厚度之差表示，称边降，$ED_d = h_d - h_{ed}$，$ED_w = h_w - h_{ew}$；

7) 局部凸起和凹入：在横截面上，局部厚度偏离了横截面轮廓曲线，且偏离部分大于规定的矩形窗口尺寸，见图 4.1-8，厚度偏大称凸起，反之称凹入。建议的矩形窗口尺寸为：宽度 $b = 10$ mm，高度 $h = 10$ μm。

(2) 平面形状

将轧制后的板带自由展开，其理想的平面形状应该是矩

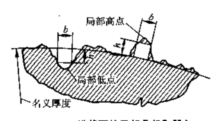
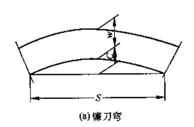


图 4.1-8 横截面的局部凸起和凹入

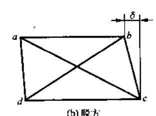
形，但由于轧制过程中变形的不均匀等原因，常会出现以下不规则的平面形状缺陷。

1) 侧弯（镰刀弯）。板带的延伸变形一边大、另一边小，造成向一侧弯曲，如同镰刀弯一样，见图 4.1-9a。弯曲程度用侧边偏离直线的最大偏移量，亦即在凹入侧的弧边与直边的最大距离 C 表示。这种平面形状缺陷也可以归入平坦度缺陷。

2) 脱方。近似平行四边形，见图 4.1-9b。用脱方偏差量 δ 表示缺陷大小，也可用对角线（ac 和 bd）之差的二分之一表示。



(a) 镰刀弯



(b) 脱方

图 4.1-9 板带的平面形状

3) 头尾（端部）形状缺陷。在轧制过程中，由于板带的不均匀延伸，板带的头部和尾部常会出现图 4.1-10 所示的鱼尾形或舌形缺陷。当出现鱼尾时，还常伴有增宽（图 4.1-11a）或失宽（图 4.1-11b）现象。轧件头尾的这种形状偏差超过允许值时，需要切掉，被切掉的长度称为切头（尾）长度。

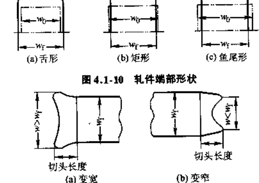


图 4.1-10 轧件端部形状

图 4.1-11 鱼尾端的两种类型

(3) 平坦度

将轧制后的板带自由展开后，常有翘曲（Buckling）成



浪形等不平坦的现象，称板带的平坦度（Flatness）或板形（Strip shape）不良。翘曲或浪形仅仅是平坦度缺陷的宏观表现，其实质是板带出现了不均匀的伸长变形，导致轧制后的板带在宽度方向的纵向长度不一致。这种不一致可以仅由最后一道次的不均匀延伸导致，也可能是前一些道次的不均匀变形积累的结果。

平坦度缺陷可形象地用图 4.1-12 所示的纤维条模型来说明。设想把有平坦度缺陷的板带纵向切分成若干个纤维条，不均匀延伸就表现为纤维条间存在长度差，长度差的大小和分布决定了平坦度缺陷的程度和类型。

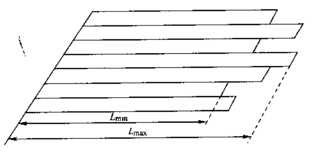


图 4.1-12　平坦度缺陷的纤维条模型

板带为一整体，纤维条间存在互相约束，延伸大的纤维被压缩、延伸小的短纤维被拉伸，这就在板带内部形成了分布不均匀的内应力。当压缩应力超过一定限度时，就会发生局部或区域性的失稳，即出现了弹性翘曲或浪形。这种可见的平坦度缺陷一般称作明板形（Apparent Shape）。在厚度较小、材质较软以及没有张力的情况下，容易出现明板形；在内应力比较小，或存在其他约束和外力的条件下，板带不一定出现失稳，因而也就没有翘曲或浪形等明板形出现，称这时为暗板形或潜板形（Latent Shape）。

在张力较大的冷轧过程，以及在卷取张力已经建立的热轧等情况下，很难看到明板形。但在去掉张力或对板带进行切分后，暗板形也可以转变成明板形。多数情况下，明板形与暗板形共存。

1）平坦度缺陷的种类。根据翘曲发生的部位、大小以及形式，平坦度缺陷主要有八种类型，如图 4.1-13 所示：

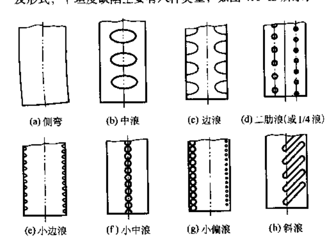


图 4.1-13　平坦度缺陷的种类

① 中浪：这是由于在宽度方向上，板带中部的伸长率大于两侧而形成的，从横截而看，它是由于中部压下率大于两边造成的。可见，横截面形状的变化与平坦度缺陷之间存在因果关系。

② 边浪：与中浪正好相反，板带中部的伸长率小于两侧。单侧边浪也称为边浪。一个简单的例子是，若横截面在轧前是矩形，轧后为中间厚两边薄的凸形，即边部的变形率大于中部，这时就会出现边浪。

③ 侧弯：也称镰刀弯，板带一侧的伸长率大于另一侧。

④ 二肋浪：距板带边侧四分之一处伸长率大于其他区域，也称 1/4 浪。

⑤ 小边浪：板带边缘的局部伸长率增大。

⑥ 小中浪：板带中心局部的伸长率增大。

⑦ 小偏浪：非常接近板带边缘的局部区域伸长率增大。

⑧ 斜浪：板带伸长率沿着宽度方向非常复杂，这种浪形看上去与板带中心线成 45°角。

2）平坦度的定义与测量原理

① 平坦度的定义及表示方法。如上所述，平坦度缺陷的实质是板带的各纵向纤维条之间存在长度差，其中，最大的长度差 ΔL_{max} 为：

$$\Delta L_{max} = L_{max} - L_{min} \tag{4.1-29}$$

式中，L_{max} 为最长纤维条长度；L_{min} 为最短纤维条长度。

为了消去长度的影响，将长度差除以纤维条的长度，得到最大相对长度差，用 ρ_{max} 表示：

$$\rho_{max} = \frac{\Delta L_{max}}{L} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L} \times 10^5 \tag{4.1-30}$$

式中，L——纤维条长度。

由于长度差 ΔL 一般远远小于纤维长度，故 L 可以是平均纤维长度，也可以是最大、最小或它们之间的纤维长度，即 $L_{min} \leqslant L \leqslant L_{max}$，具体可视情况和需要而定，不论采用哪一个，对结果影响很小。

最大相对长度差 ρ_{max} 反映了板带的平坦度缺陷大小，因此，平坦度就可以用相对长度差表示。

由于相对长度差数值很小，为了使用方便，一般乘以 10^5，它的单位是 I－Unit，简写为 IU 或 I。它是表示平坦度的常用计量单位。对于 100 m 的板带，若有 1 mm 的长度差，其相对长度差就是 1 个 IU。高精度的冷轧机，可以将相对长度差控制在 10 个 IU 以内。

由于不可能将板带切成纵条，所以，最长和最短纤维条的长度是无法准确测量的，因此，一般不直接用最大相对长度差 ρ_{max} 来表示平坦度。特别是在实际生产中，不仅要知道平坦度的大小，还要知道平坦度缺陷的类型，因此，有时通过直接或间接的方式测量多条纤维的长度，比较它们的大小，确定它们的分布。例如，针对中浪和边浪这两种最常见的平坦度缺陷，测量中部和边部的纤维条长度，计算中部纤维与二条边部纤维长度平均值的相对长度差 ρ_s，表示平坦度缺陷的对称部分：

$$\rho_s = \frac{L_c - \dfrac{L_w + L_d}{2}}{L} \times 10^5 \tag{4.1-31}$$

式中，L_c 为板带中部的纤维条长度，下角标 c 代表板带中部；L_w、L_d 为板带两边的纤维条长度，下角标 w 和 d 分别代表轧机的工作侧和传动侧。

ρ_s 大于零时为中浪，反之为边浪。另外，用边部二条纤维之间的相对长度差 ρ_d 表示平坦度缺陷的不对称部分：

$$\rho_d = \frac{L_w - L_d}{L} \times 10^5 \tag{4.1-32}$$

对于不同的要求，可以采用不同部位的纤维条进行类似的计算，例如，针对二肋浪，就需要测量距离板边四分之一处纤维条长度。

② 基于纤维长度的平坦度测量原理　实际生产中，对于图 4.1-14 所示的可见翘曲或浪形，常采用直接测量纤维条长度的方法计算平坦度。即取水平长度为 L_0 的一段板带，测量该段内某纤维条的长度 L_i，计算 L_i 与 L_0 的相对差并乘以 10^5，它是起浪纤维条的曲线长度与直线长度之差的相对



值，尽管不涉及拉伸变形，但因与拉伸变形中计算伸长率的公式相似，习惯上把它称为相对延伸，这里用 ε_i 表示：

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 10^5 \qquad (4.1\text{-}33)$$

式中，L_0 为纤维的水平长度；L_i 为纤维的曲线长度，下标 i 表示板内的第 i 条纤维。

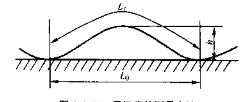


图 4.1-14　平坦度的测量方法

分别测量板带中部和两个边部的相对延伸，用中部值减去两个边部相对延伸的平均值，得到相对延伸的差值，简称相对延伸差：

$$\varepsilon_c - \frac{\varepsilon_w + \varepsilon_d}{2} = \frac{L_c - \dfrac{L_w + L_d}{2}}{L_0} \times 10^5 = \rho_s \qquad (4.1\text{-}34)$$

式中，ε_c 为板带中部相对延伸；ε_w、ε_d 为两个边部的相对延伸。

显然，这个相对延伸差与式（4.1-31）表示的相对长度差是一致的。同样，计算两个边部的相对延伸的差，同样得到与式（4.1-32）一致的结果：

$$\varepsilon_w - \varepsilon_d = \frac{L_w - L_d}{L_0} \times 10^5 = \rho_d \qquad (4.1\text{-}35)$$

显然，这里的相对延伸差实际就是相对长度差，也就是平坦度。

假设板带边部没有翘曲，即其纤维长度等于 L_0 时，有：

$$\varepsilon_c = \rho_s$$

即相对延伸差等于相对长度差。

③ 基于波浪高度的平坦度测量原理　在翘曲的板带上测量纤维条长度很不方便，有时采用更为简单的方法。如图 4.1-14 所示，一般板带的翘曲曲线呈周期性的波浪，波浪的波高和长度容易测量。因此，用两者的比值表示平坦度就更为简单。该比值称为波浪度（或称陡度、翘曲度），用 φ_i 表示：

$$\varphi_i = \frac{h_i}{L_0} \times 100\% \qquad (4.1\text{-}36)$$

式中，h_i 为某条纤维波浪的高度。

如果把波浪形近似为幅高为 $\frac{h_i}{2}$、周期为 L_0 的正弦曲线，则波浪高度 h_i 与相对延伸 ε_i 的关系为：

$$\varepsilon_i \approx \left(\frac{\pi h_i}{2L_0}\right)^2 \times 10^5 = \frac{\pi^2}{4}\varphi_i^2 \times 10^5 \approx 2.467\varphi_i^2 \times 10^5 \qquad (4.1\text{-}37)$$

或

$$\varphi_i \approx \frac{2}{\pi}\sqrt{\varepsilon_i \times 10^{-5}} \approx 0.002\sqrt{\varepsilon_i} \qquad (4.1\text{-}38)$$

显然，在这种情况下，不需要测量波浪的长度，只测波浪的高度就可以得到平坦度的大小。一些工厂就是基于这个原理进行平坦度的检测的。

④基于张力差的平坦度测量原理　当板带受到张力时，板带的长度差会表现为张力分布的不均匀，因此通过测量张力分布的方法也可以测量平坦度，说明如下。

如图 4.1-15 所示，对于水平长度为 L_0 的一段板带，在张力 S 的作用下被弹性拉伸至 L_S，该段内某条纤维的张力为：

$$T_i = BhE\left(\frac{L_S - L_i}{L_i}\right) \qquad (4.1\text{-}39)$$

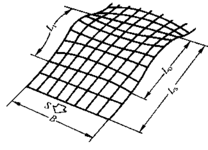


图 4.1-15　基于张力分布的平坦度测量原理

式中，B、h、E 为板带的宽度、厚度和弹性模量；L_S 为板带被拉伸后的长度；L_i 为纤维条长度。

段内纤维条的平均张力为：

$$\begin{aligned}\overline{T} &= \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i = BhE\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{L_S - L_i}{L_i} \\ &\approx BhE\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{L_S - L_i}{L_0} = BhE\left(\frac{L_S - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}L_i}{L_0}\right) \\ &\approx BhE\left(\frac{L_S - L_0}{L_0}\right)\end{aligned} \qquad (4.1\text{-}40)$$

式中，n 为纤维条数。

单条纤维张力与平均张力之差：

$$\begin{aligned}\Delta T_i &= \overline{T} - T_i = BhE\left(\frac{L_S - L_0}{L_0} - \frac{L_0 - L_i}{L_i}\right) \\ &\approx BhE\left(\frac{L_i - L_0}{L_0}\right) \\ &= BhE\varepsilon_i\end{aligned} \qquad (4.1\text{-}41)$$

上式给出了纤维条的张力差 ΔT_i 与相对延伸 ε_i 之间的关系，是利用张力分布测量平坦度的原理。冷轧的平坦度检测仪多是基于这个原理。

2.5　板带产品的公差标准

（1）尺寸公差的各种标准

世界上许多国家都制定了热轧和冷轧板带产品的尺寸公差标准，下面列出主要工业标准：

1）DIN，德国工业标准（Deutsches Institut für Normung e.V.）。

2）JIS，日本工业标准（Japanese Industrial Standard）。

3）ASTM，美国测试和材料学会标准（American Society for Testing and Materials）。

4）BS，英国标准协会标准（British Standards Institution）。

5）ISO，国际标准化组织标准（International Organization for Standardization）。

（2）尺寸公差的例外情况

由于以下原因，通常给板带轧制产品公差规定例外情况。

1）在加速穿带和减速抛尾过程中，由于轧制条件的变化通常会引起轧件几何参数的变化。因此，一般对于稳定运行条件下轧制的板带以严格的公差标准进行要求，而对于在加速穿带和减速抛尾等非稳定条件下轧制的板带，公差要求可以放宽一些。

2）由于原料的硬度、几何尺寸等参数的不理想或有较大的波动，使得现有设备不能消除其影响时，通常规定相应的公差范围。在来料的偏差超出规定的公差范围时，也应对产品的公差要求适当放宽。

3）轧机设定不好会引起板带头部几何偏差增大，这与由轧机性能所引起的误差不同，因此，一般将产品的头部和其余部分分别进行设计，头部采用稍大的公差范围。



4）要考虑测量设备的不完善对测量数据可靠性的影响。例如，在带钢建立张力之前，射线测量仪的测量结果不够准确，而扫描式测厚仪在测量板边厚度时，精度往往不高。

（3）厚度公差

厚度公差的制定要考虑各种不同的情况：

1）宽度的影响。大多数工业标准规定，宽度越大，厚度公差也越大。

2）厚度的影响。由于薄带轧制更加困难，所以，尽管绝对公差随着厚度的减小而减小，但相对公差随着厚度的减小而增大。

3）带钢头尾的公差。考虑到在穿带、加速、减速及抛尾轧制时，轧制过程的控制变得复杂和困难，一般允许轧件头部和尾部有较大的公差。

4）焊缝的允许公差。由于在焊缝及附近区域的厚度控制比较困难，因此，允许在焊缝附近一定长度范围内的厚度公差比其余部分大。

5）整卷公差。整卷公差包括了带钢的任何点偏离目标厚度的系统公差和随机公差。规定公差必须在目标厚度某一范围（如±10%）之内的板带质量所占的最小百分比。该百分比随着批量的增加而增加。例如，批量为 5.5 t 以下时，95%以上的板带必须控制在目标值±10%的范围以内。当批量达到 68 t 以上时，该百分比增加到 99.5%以上。

6）头部厚度锁定。用于冷轧的热轧带钢，虽然减小厚度波动是非常重要的，但在许多情况下，当带钢的头部厚度超差时，余下部分可以不必追求目标值，只要保持与头部的厚度一致即可，这样可以获得厚度比较均匀一致的原料，有利于冷轧过程的稳定。

7）带钢边缘区域的处理。在大多数工业标准中，测量厚度时排除了带钢边缘区域，因此在该区域也不规定厚度公差。这是因为在板带的边缘，存在厚度骤减区，控制和测量该区域的厚度比较困难。

热轧和冷轧板的厚度偏差国家标准见表 4.1-1 和表 4.1-2。

表 4.1-1 热轧板的厚度偏差国家标准

厚度/mm \ 宽度	厚度允许偏差/mm					
	宽度 = 600 ~ 750 mm		宽度 > 750 ~ 1 000 mm		宽度 > 1 000 ~ 1 500 mm	
	A 级精度	B 级精度	A 级精度	B 级精度	A 级精度	B 级精度
>0.35 ~ 0.50	±0.05	±0.07	±0.05	±0.07	—	—
>0.50 ~ 0.60	±0.06	±0.08	±0.06	±0.08	—	—
>0.60 ~ 0.75	±0.07	±0.09	±0.07	±0.09	—	—
>0.75 ~ 0.90	±0.08	±0.10	±0.08	±0.10	—	—
>0.90 ~ 1.10	±0.09	±0.11	±0.09	±0.12	—	—
>1.10 ~ 1.20	±0.10	±0.12	±0.11	±0.13	±0.11	±0.15
>1.20 ~ 1.30	±0.11	±0.13	±0.12	±0.14	±0.12	±0.15
>1.30 ~ 1.40	±0.11	±0.14	±0.12	±0.15	±0.12	±0.18
>1.40 ~ 1.60	±0.12	±0.15	±0.13	±0.15	±0.13	±0.18
>1.60 ~ 1.80	±0.13	±0.15	±0.14	±0.17	±0.14	±0.18
>1.80 ~ 2.00	±0.14	±0.16	±0.15	±0.17	±0.16	±0.18
>2.00 ~ 2.20	±0.15	±0.17	±0.16	±0.18	±0.17	±0.19
>2.20 ~ 2.50	±0.16	±0.18	±0.17	±0.19	±0.18	±0.20
>2.50 ~ 3.00	±0.17	±0.19	±0.18	±0.20	±0.19	±0.21
>3.00 ~ 3.50	±0.18	±0.20	±0.19	±0.21	±0.20	±0.22
>3.50 ~ 4.00	±0.21	±0.23	±0.22	±0.26	±0.24	±0.28
>4.00 ~ 5.50	+0.10 -0.30	+0.20 -0.40	+0.15 -0.30	+0.30 -0.40	+0.10 -0.40	+0.30 -0.50
>5.50 ~ 7.50	+0.10 -0.40	+0.20 -0.50	+0.10 -0.50	+0.20 -0.60	+0.10 -0.50	+0.25 -0.60
>7.50 ~ 10.0	+0.10 -0.70	+0.20 -0.80	+0.10 -0.70	+0.20 -0.80	+0.20 -0.70	+0.30 -0.80
>10.0 ~ 13.0	+0.10 -0.70	+0.20 -0.80	+0.10 -0.70	+0.20 -0.80	+0.10 -0.70	+0.20 -0.80

表 4.1-2 冷轧板的厚度偏差国家标准

厚度/mm \ 宽度	厚度允许偏差/mm			
	宽度≤1 500 mm		宽度 > 1 500 ~ 2 000 mm	
	A 级精度	B 级精度	A 级精度	B 级精度
0.2 ~ 0.5	±0.04	±0.05	—	—
>0.5 ~ 0.65	±0.05	±0.06	—	—
>0.65 ~ 0.9	±0.06	±0.07	—	—
>0.9 ~ 1.1	±0.07	±0.09	±0.09	±0.11
>1.1 ~ 1.2	±0.09	±0.10	±0.10	±0.12
>1.2 ~ 1.4	±0.10	±0.11	±0.12	±0.14
>1.4 ~ 1.5	±0.11	±0.12	±0.13	±0.15
>1.5 ~ 1.8	±0.12	±0.14	±0.14	±0.16
>1.8 ~ 2.0	±0.13	±0.15	±0.15	±0.17
>2.0 ~ 2.5	±0.14	±0.16	±0.17	±0.18
>2.5 ~ 3.0	±0.16	±0.18	±0.19	±0.20
>3.0 ~ 3.5	±0.18	±0.20	±0.20	±0.21
>3.5 ~ 4.0	±0.19	±0.22	±0.21	±0.24
>4.0 ~ 5.0	±0.20	±0.23	±0.22	±0.25

（4）宽度公差

宽度公差通常采用正偏差。剪边产品和不剪切边产品的宽度公差具有明显的区别。宽度公差通常随着宽度的增加而增加，高强度材料产品的公差更大。相关国家标准见表 4.1-3。

表 4.1-3 宽度偏差国家标准

公称宽度/mm	宽度允许偏差/mm
≤1 000	+6
>1 000	+10
不剪纵边的钢带	+15

（5）平坦度公差

由于检测方法的原因，用波浪高度表示平坦度最为简单和方便。本章 2.4.3 曾指出，在假设波浪为正弦曲线的情况下，用波浪高度可以较好地反映平坦度。平坦度公差通常随着宽度的增加而增加，随着厚度的增加而减小。随着平坦度检测技术的发展，直接或间接测量相对长度差的方法得到了越来越广泛的应用。

（6）侧弯公差

侧弯公差按侧边偏离直线的最大偏移量，即凹入侧的弧边与直边的最大距离测量。测量时需要确定一定的测量长度，例如 2 500 ~ 10 000 mm。

边部侧弯公差随宽度的增加是否变化以及如何变化，不同的标准也有所不同。有的随宽度的增加而增加，有的随宽度的增加而降低。

（7）凸度和楔形公差

凸度和楔形公差范围取决于轧制产品的类型以及板带的厚度、宽度等，见表 4.1-4。

表 4.1-4 某厂热轧带钢的凸度和楔形标准

宽度/mm	凸度/mm	楔形/mm
600 ~ 1 200	≤0.08	≤0.07
1 200 ~ 1 500	≤0.10	
>1 550	≤0.13	

3 板带轧机

轧机是使轧件完成塑性变形的主要设备，它由工作机座、传动装置（接轴、齿轮座、减速机、联轴器）及主电动机组成。板带的轧制可以由一架或数架按直线排列的轧机完成。

板带轧机一般按轧辊的辊身长度（亦称辊面长度）标称，因为辊身长度与其能够轧制的板带的最大宽度有关。例如，某 1 700 mm 轧机，其辊身长度为 1 700 mm，可以轧制的最大宽度为 1 580 mm 左右。

3.1 轧机的结构及组成

板带轧机的种类很多，一台轧机主要由以下部分组成见图 4.1-16 和图 4.1-17。



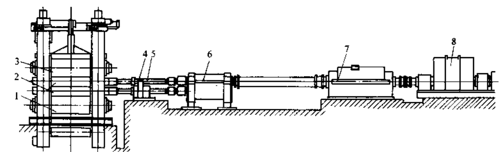


图 4.1-16　轧机工作机座及传动系统示意图

1、3—支承辊；2—工作辊；4—连接轴支座；5—连接轴；6—齿轮机座；7—减速机；8—电动机

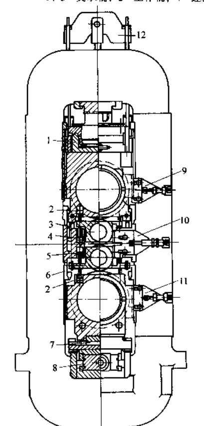


图 4.1-17　四辊轧机工作机座的窗口布置简图

1—压下液压缸；2—工作辊负弯液压缸；
3—上支承辊平衡缸；4—上工作辊平衡和正弯液压缸；
5—下工作辊压紧缸；6—工作辊换辊辊道；7—测压仪；
8—下辊高度调整装置；9、11—支承辊轴向压板；
10—工作辊轴向压板；12—压下液压缸平衡架

1）直接轧制板带的工作辊，由电动机通过齿轮和主轴驱动。

2）用于支撑工作辊以减少其弯曲变形的支承辊。

3）用于调整辊缝开度的压下装置（电动或液压）以及轧制线高度调整机构。

4）用于安装轧辊及其他部件并承受轧制负荷的机架。

5）轧辊平衡装置以及液压弯辊装置。

6）用于驱动轧辊转动的传动装置。

以上为常见的水平轧机，即轧辊轴线水平布置，上下辊在一个垂直平面内，用于板带厚度方向的轧制。另外还有一种轧机，轧辊轴线垂直布置，用于宽度方向的轧制，控制宽度，改善边部质量。图 4.1-18 是带有宽度自动控制（AWC）功能的立辊轧机。其中的电动压下系统用于调整辊缝宽度，AWC 液压缸用于辊缝宽度的快速调整，以补偿因轧机弹跳变化引起的辊缝宽度的变化。

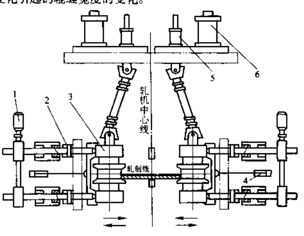


图 4.1-18　有 AWC 功能的立式轧机

1—电动侧压下系统；2—AWC 液压缸；3—立辊；4—回拉缸；
5—接轴提拉装置；6—主传动电动机

3.2　板带轧机的分类

（1）按轧辊的数量和布置形式分类

1）二辊轧机（图 4.1-19a）。两个工作辊布置在同一个垂直平面内。这类轧机应用最广，分可逆式轧机（每轧制一个道次改变一次轧辊的转动方向，往返轧制）和不可逆轧机（轧件在每个机架中只通过一次）。一般用于热轧的粗轧。

2）三辊轧机（图 4.1-19b）。在三辊轧机机架中，上、下轧辊按相同方向转动，不反转。中辊按相反方向转动。用于中厚板生产的三辊劳特式轧机的中辊不传动，且直径略小。在轧件通过中间辊与下辊之间完成下部道次轧制后，中间辊下降，轧件上升，进入上辊与中间辊之间，进行上部道次的轧制。

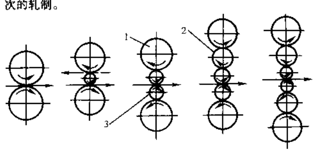


图 4.1-19　轧辊在机架中的数量及排列方式

1—支承辊；2—中间辊；3—工作辊

3）四辊轧机（图 4.1-19c）。有两个工作辊和两个支承辊。支承辊的作用是增强辊系的刚度，便于采用小直径工作辊来降低轧制负荷。支承辊的直径一般是工作辊直径的 2 倍



以上。例如，某四辊冷轧机，工作辊直径为650 mm，支承辊直径为1 450 mm左右。四辊轧机广泛用于板带轧制，如中厚板轧机、热轧薄板轧机、冷轧薄板轧机等。四辊轧机多采用工作辊传动。

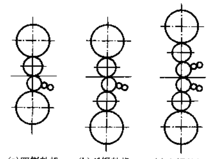
四辊CVC（Continuously Variable Crown）轧机的工作辊带有特殊的辊形，通过轴向抽动，可以实现辊缝凸度的连续变化（见图4.1-47），具有较强的板形控制能力。

PC轧机（Pair Cross）的上辊系（包括上工作辊和上支承辊）与下辊系（包括下工作辊和下支承辊）可以整体交叉，以改变辊缝凸度（见图4.1-48），提高了板形控制能力。

4）五辊轧机（图4.1-19 d）。由四辊轧机发展而来，在上工作辊和支承辊之间增加了一个中间辊。这样可以进一步减小上工作辊直径，并可实现异步轧制。

5）六辊轧机（图4.1-19 e）。在四辊轧机的基础上增加两个中间辊。其中，中间辊可轴向抽动的六辊轧机（如HC轧机和六辊CVC轧机）可以显著提高轧机对板形的控制能力。

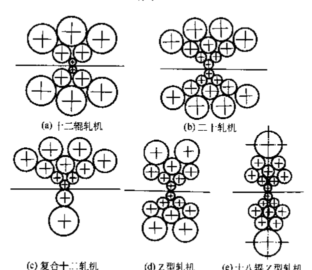
6）带偏支承辊的轧机（图4.1-20）。这类轧机的工作辊比较小，轧制力小，用于薄板的轧制。为了防止工作辊水平弯曲，在轧机的出口方向设有侧中间辊和侧支承辊，以提高工作辊的水平刚度。



(a)四辊轧机　(b)五辊轧机　(c)六辊轧机

图4.1-20 带偏支承辊的轧机

7）多辊轧机（图4.1-21）。工作辊由多层中间辊支承，而中间辊又由多个支承辊支承，工作辊直径可以大大减小，机架尺寸同步以减小，刚度和强度得以提高。由于工作辊直径很小，难以承受扭转力矩，一般采用中间辊传动。这类轧机多用于冷轧薄板的轧制，特别是难变形材料的轧制，如不锈钢、电工钢以及高合金钢等。



(a)十二辊轧机　(b)二十辊轧机

(c)复合十二辊轧机　(d)Z型轧机　(e)十八辊Z型轧机

图4.1-21 多辊轧机

8）具有水平辊和立辊的轧机。在二辊或四辊轧机上增加带立辊的轧机，其作用是从水平方向压缩轧件的侧边，以生产边部整齐的板材。这类轧机也可叫做万能轧机。

（2）按轧制方向分类

1）不可逆轧机。轧机对一块轧件按一个方向轧制，且只轧制一次。

2）可逆式轧机。通过轧机的正反转，对轧件进行两个方向的往复轧制。

3）返回道次轧机。按一个方向轧制后，打开辊缝，轧件返回，轧辊闭合进行下一道次的轧制。

（3）按轧制温度分类

1）热轧机。热轧过程通常在轧件温度等于或稍低于1 315℃时开始，在高于或稍低于A_3临界温度时结束，对于低碳钢，这个临界温度大约为900℃。这样，在轧件的金相组织处于奥氏体时即完成轧制过程。热轧条件下基本没有加工硬化现象。

2）冷轧机。冷轧过程通常是在轧件的初始温度等于室温的条件下进行。由于塑性变形热和轧辊与轧件之间的摩擦，轧件的温度可以升高到50～65℃。冷轧时，轧件会出现明显的加工硬化现象，轧制负荷比热轧大。

（4）按轧制产品

1）板坯初轧机。板坯初轧机的辊缝可大幅度打开，用于把钢锭轧制成150～300 mm厚的板坯。通过翻钢操作，可以把钢锭横向翻转90°，对板坯边部进行轧制以改变宽度。

2）中厚板轧机。热轧中厚板轧机把板坯轧成中厚板或卷。板的宽度可以达到5 000 mm以上。

3）带钢轧机。热带钢轧机可以板坯轧成厚度达到1.2 mm的板卷。冷带钢轧机把来自热带钢轧机的板卷进一步轧制到需要的厚度。产品宽度一般为600～2 000 mm左右。

（5）按轧机的布置形式

1）单机架式。这是最简单的一种布置形式，轧件只在一架轧机上轧制。

2）连续式。相邻机架之间的距离比相应轧件长度小，使轧件能同时在两架或两架以上的轧机中连续轧制。为保证不使轧件在机架间拉断或产生过大的活套，各机架的轧制速度应符合"金属秒流量相等"的原则，即保证每秒中内通过每一机架的金属体积相等。典型的连续式布置有：

① 万能轧机。它是一个水平轧机与一个立式轧机实现连轧，这种轧机可以同时进行厚度和宽度方向的轧制。

② 连轧机。两架或两架以上的水平轧机串列布置，实现连轧。如七机架热连轧精轧机组和五机架冷轧薄板机组等。

4 板带轧制生产工艺

4.1 中厚板

（1）中厚板轧机

常用的中厚板轧机主要有四种：二辊可逆式轧机、三辊劳特式轧机、四辊可逆式轧机和万能轧机，见本章3.2节。

轧机的布置上有单机架式、双机架式和连续式（含半连续式和3/4连续式）。单机架式是指用一台轧机完成整个轧制过程，设备投入少，但产量和产品质量不高。双机架式是指用两台轧机分别承担粗轧和精轧过程，与单机架式比，不仅产量高，产品的表面质量、尺寸精度和板形都比较好。连续式产量和质量都比较高，但设备投入大，板的宽度也不能太大。用生产薄规格的连续式轧机生产中厚板在经济上也是不合理的。

（2）原料选择

1）原料的种类。用于生产中厚钢板的原料有扁钢锭、初轧板坯、锻坯和连铸板坯等几种。

2）原料的尺寸。原料的尺寸包括厚度、宽度和长度。它直接影响着轧机的生产率、坯料的成材率以及钢板的力学性能。原料尺寸的选择原则是：在保证压缩比的前提下厚度应尽可能小。不同的原料对压缩比的要求也不相同，一般认为连铸坯的压缩比为3～5左右（也有资料认为应大于8），



扁锭的压缩比为6（也有资料认为应在12～15以上），而模铸的初轧坯由于已在初轧机上变形，在中厚板轧机上的压缩比可不受限制。随着炼钢技术的发展，钢质的提高，连铸坯质量也不断提高，压缩比在逐渐减小。目前可用300 mm厚的连铸坯生产80 mm以下的中厚板，其压缩比仅有3.7。

生产厚度大于150 mm的厚钢板需要大型水压机将钢锭锻压成坯料，很不方便，成本也很高。

原料的宽度尺寸应尽量大，以减少横向展宽轧制道次。原则上原料的长度越大越好，但最大长度受设备条件限制。

原料尺寸的选择还需满足轧机设备和加热炉的各种限制条件，并且也要照顾到炼钢车间的生产。

3）原料的材质。原料的材质首先要保证化学成分，减少杂质，其次要保证钢锭或连铸坯的浇铸质量。

4）原料表面缺陷的清理。原料在进行加热前要进行表面清理。清理方法分热状态下清理和冷状态下清理两种。热状态清理一般为火焰清理，火焰清理机安装在连铸机（或开坯机）和切割机（或大型剪断机）之间，对板坯进行全面的剥皮处理，清理深度一般为0.5～5 mm。全面剥皮清理可以保证板坯的表面质量，但金属消耗较大。冷态清理方法有局部火焰清理、风铲铲削、砂轮修磨、机床加工、电弧清理等。对缺陷严重部分亦可用切割方法去除。由于板坯表面缺陷被隐藏在氧化铁皮之下或位于皮下区域，因此是比较难于发现的。解决这个问题的最合理办法是生产无缺陷连铸坯，即生产既无表面缺陷又无内部缺陷的高温连铸坯。

（3）加热

加热的目的是使坯料在轧制时具有良好的塑性和较低的变形阻力。对于某些合金钢钢锭，加热还可以使钢中化学成分得到均匀扩散。

生产中厚板用的加热炉按其结构分为连续式加热炉、室式加热炉和均热炉三种。均热炉用于将钢锭轧制特厚钢板的情况。室式炉适用于特重、特轻、特厚、特短的板坯，或多品种、少批量及合金钢的坯或锭，生产比较灵活。连续式加热炉适用于少品种、大批量生产，加热坯料的质量一般小于30 t。

由于现代中厚板轧机已经很少使用钢锭作为原料，因此作为钢锭加热的主要设备——均热炉在中厚板车间中已很少见或不是主要的了。从发展的趋势来看，中厚板生产今后也会和其他产品一样走向连铸—连轧的技术道路，但目前来看还只能是达到连铸—热送轧制或连铸—热装轧制的水平，也就是说，加热炉即使在全部以连铸坯为原料的中厚板厂中也是不能取消的。

用于板坯加热的连续式加热炉主要有推钢式和步进梁式两种。20世纪60年代以前主要采用上部、下部加热段，上部均热段的三段推钢式连续加热炉，20世纪70年代后已采用预热、加热、均热各段上下都加热的五段推钢式或步进梁式连续加热炉，使炉子全部都成为燃烧区，加热能力从三段式的80～100 t/（h·座），大幅度提高到150～300 t/（h·座）。

在加热炉的质量控制上，为了减少黑印，在推钢式加热炉中都采用了热滑轨全架空加热炉，消除了冷却管与板坯的直接接触，提高了坯料加热的均匀性。但其主要缺点是板坯下表面容易在推钢前进时被擦伤和易于翻炉。板坯尺寸和炉子长度（亦即炉子产量）也受到限制，而且排空困难，劳动条件差。采用步进梁式加热炉可以避免以上缺点。特别是板坯受到四面加热，加热均匀，有利于消除下表面的划伤和适应板坯厚度尺寸的变化，即使加热薄板坯，炉子长度仍然可以很大。步进炉投资较大，结构复杂，维修较难，热量单耗大，并且由于支持梁妨碍辐射，使板坯上下表面往往仍有一些温度差。因此，目前厚板轧机的加热炉仍然是推钢式和步进梁式两种炉子并存的局面。

为了减少在出炉时板坯表面的损伤，现代厚板轧机加热炉的出料都采用抽出机以代替过去利用斜坡滑架和缓冲器进行出料的方式。

连续式加热炉不能对少量板坯作特殊加热，故在有些厚板厂，为了加工一些批量不大的特厚钢板和复合钢板，还同时建有一、二座室式加热炉，由机械手完成装炉和出炉作业。

提供优质的加热板坯除要选择合理的加热炉型外，还要靠合理的热工制度来保证，它包括确定加热温度、加热速度、加热时间、炉温制度以及炉内气氛等。合理的热工制度就是要能提供满足轧机产量需要、温度均匀、不产生各种加热缺陷、表面氧化铁皮最少的钢坯，同时使燃料消耗最低。

（4）轧制

中厚板轧制可分为除鳞、粗轧、精轧三个阶段。

1）除鳞。除鳞是将在加热时生成的氧化皮（初生氧化铁皮）去除干净，以免压入钢板表面形成表面缺陷。初生氧化铁皮要在轧制开始阶段去除，因为这时氧化皮尚未压入钢中，易于去除，同时清除面积少。

清除氧化皮的方法很多，过去曾经采用过投人竹枝、荆条、食盐等方法，但效果不好，以后也曾经采用专门的二辊轧机、立辊轧机给钢坯（或钢锭）施以小的变形量，使氧化皮与金属分离，然后用高压水或高压空气将氧化皮冲去。这种方法虽然可以获得较好的清除氧化皮效果，但是投资较大。

现代化的中厚板轧制生产线上，已经普遍采用结构简单、设备质量轻、清除氧化皮效果好的高压水除鳞装置（见图4.1-22）。高压水通过上下集管的喷嘴喷射到板带的上下表面，利用水的动能清除初生氧化皮。喷嘴的位置可以根据板子的厚度调整，以保证最佳的喷水距离，获得更好的除鳞效果。水压过去一般在10～12 MPa左右，现在则达到了15～22 MPa以上。对于合金钢板，因氧化皮与钢板间结合较牢，需要采用较高的喷水压力。

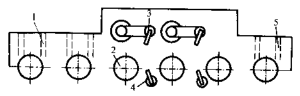


图4.1-22　高压水除鳞装置

1—除鳞装置入口；2—除鳞辊道；3—上除鳞集管；4—下除鳞集管；5—除鳞装置出口

在以钢锭为原料的中厚板厂采用立辊轧机还是有必要的。一是利用立辊挤破钢锭外表面的初生氧化皮，然后再用高压水冲去；二是立辊还可起到消除钢锭锥度的作用。

由于轧制过程中，暴露在空气中的高温板还会生成次生氧化铁皮，所以，在轧机前后都安装有高压水喷头，在整个的粗轧、精轧过程中都要对轧件进行多次的高压水除鳞。

2）粗轧。粗轧阶段的主要任务是将板坯或扁锭展宽到所需要的宽度并进行大的压缩变形。根据原料条件和产品要求，可以采用不同的轧制方法：全纵轧法、综合轧制法、全横轧制法、角轧-纵轧法。

① 全纵轧法。所谓纵轧就是钢板的伸长方向与原料（钢锭或钢坯）纵轴方向相一致的轧制方法。当原料的宽度稍大于或等于成品钢板的宽度时就可不用展宽轧制，而直接采用纵轧轧成成品，所以称全纵轧法。全纵轧法由于操作简单所以产量高，轧制钢锭时钢锭头部的缺陷不致扩展到钢板的全长上去。但全纵轧法由于在轧制中（包括在初轧开坯时）轧件始终沿着一个方面伸长，使钢中偏析和夹杂等呈明显的带状分布，带来钢板组织和性能的各向异性，使横向性能（尤其是冲击性能）降低。全纵轧法由于无法用轧制方法调整原料的宽度和钢板组织性能的各向异性，因此在实际生产中用的并不多。



② 综合轧制法，即横轧-纵轧法。横轧即钢板的伸长方向与原料的纵轴方向相垂直的轧制（图4.1-23）。综合轧制法一般分为三步，首先纵轧1～2道，平整板坯，称为成形轧制，然后转90°进行横轧展宽，使板坯的宽度伸长到所需的板宽，称为展宽轧制，然后再转90°进行纵轧成材，称为伸长轧制。综合轧制法是生产中厚板中最常用的方法。其优点是：板坯宽度不受钢板宽度的限制，可以根据原料情况任意选择，比较灵活；由于轧件在横向有一定的伸长，改善了钢板的横向性能。通常连铸坯的规格尺寸比较少，因此更适合采用综合轧制法。但此法在操作中从原料到横轧、从横轧到纵轧，轧件共有两次90°旋转，因此使产量有所降低，并易使钢板成桶形，增加切边损失，降低成材率。此外由于板坯横向伸长率还不大，使钢板组织性能各向异性改善还不够明显，横向性能仍然容易偏低。

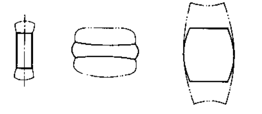

(a)纵轧　(b)转90°后横轧展宽　(c)再转90°后伸长轧制

图4.1-23　综合轧制法

③ 全横轧法，即将板坯进行横轧直至轧成成品。此法只能用于板坯长度大于或等于钢板宽度的情况。当用连铸板坯作原料时，采用全横轧法与采用全纵轧法一样会造成钢板组织性能明显的各向异性。但如果用初轧板坯作原料，那么由于初轧时轧件的伸长方向与厚板轧制时的伸长方向相垂直，因而大大地改善钢板的各向异性，显著改善钢板的横向性能。为使钢板性能较为均匀，应该在由钢锭算起的总变形中使其纵向和横向的压下率相等。根据这一原则就可以确定中厚板轧制需的板坯厚度。此外全横轧法比综合轧制法可以得到更整齐的边部，钢板不易成桶形（图4.1-24），因而减少了切损。还由于全横轧法比综合轧制法减少了一次转钢时间，使产量有所提高。因此全横轧法经常用于以初轧坯为原料的中厚板生产。但由于受到钢坯长度规格数量的限制，调整钢板宽度的灵活性小。

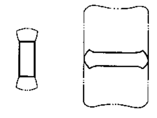

(a)纵向放置的轧件　(b)转90°后横轧

图4.1-24　全横轧法

④ 角轧-纵轧法。所谓角轧就是将轧件纵轴与轧辊轴线成一定角度送入轧辊进行轧制的方法。其送入角在15°～45°范围内变化，每一对角线轧制1～2道后即更换到另一对角线进行轧制。轧件在角轧时，每轧一道都会使轧件在原宽度方向得到一定伸长而使宽度加大，同时轧件会变成平行四边形。当轧件转向另一对角线轧制时，轧件宽度继续加大，而轧件从平行四边形回到矩形。

角轧的优点是可以改善咬入条件、减少咬入时产生的巨大冲击力，而且角轧时轧件和轧辊的接触宽度小于横轧，因而也使轧制压力减少，从而改善了板形、提高了产量。角轧-纵轧法由于使轧件在纵、横两个方向上都得到变形，因而能改善轧件的各向异性。缺点是需要拨钢，因而使轧制周期延长，降低了产量，而且送入角及钢板形状难以控制，使切损增大、成材率降低，劳动强度大、操作复杂、难以实现自动化。因此角轧-纵轧法只用在用钢锭作原料的三辊劳特式轧机上。

3）精轧。精轧阶段的主要任务是质量控制，包括厚度、板形、表面质量、性能控制。轧制的第二阶段粗轧与第三阶段精轧间并无明显的界限。通常把双机座布置的第一台轧机称为粗轧机，第二台轧机称为精轧机。对两架轧机压下量分配上的要求是希望在两架轧机上的轧制节奏尽量相等，这样才能提高轧机的生产能力。一般的经验是在粗轧机上的压下约占80%，在精轧机上约占20%。

20世纪70年代后，世界上中厚板生产已从单纯追求产量到更重视产品质量、降低成本、降低能耗和原材料上来，提高收得率就是达到这一目的的有效手段。对于中厚钢板生产，影响收得率的因素中平面形状不良（影响切头、切尾和切边）造成的收得率损失约占收得率损失的49%，占总收得率损失的5%～6%左右。因此中厚板生产轧制阶段的任务就从过去对产品尺寸的一般要求发展到要使钢板轧后平面形状接近矩形。

传统的轧制方法轧出的钢板是得不到矩形的。通常在轧制平板时轧件在轧制方向伸长的同时横向也在变形，即产生宽展。按照变形特点，宽展现象多发生在轧件的前后端，所以轧制后的钢板不会成为矩形。这种现象主要发生在钢板厚度较厚时，即发生在钢板生产的成形轧制和展宽轧制阶段，而轧制终了时的平面形状则是各个阶段上发生的形状变化的综合反映。

当轧制宽度与板坯宽度之比小，即横向轧制比小，而轧制长度与板坯长度之比大，即纵向轧制比大时，轧制成形后的轧件成舌形，前端和后端切头成凸形，侧边切边成凸头形。反之横轧比大而纵轧比小时，轧制成形后成鱼尾形，前后端切头成凹形，侧变切边变成鼓形，见图4.1-25。

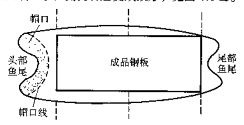


图4.1-25　由扁锭直接轧成厚板时成品板的平面形状示意图

为了使轧制后钢板平面形状接近矩形，过去曾经采用过改进板坯形状和调整展宽率（即改变横轧比和纵轧比）等办法，效果都不明显。20世纪70年代以后，由于高精度、快速响应性的液压AGC装置及高精度光学仪器的应用，出现了许多新平面形状控制办法。

（5）热矫直

中厚板轧后精整工序包括矫直、冷却、划线、剪切、检查、缺陷清除和热处理等。

热矫直是使板形平直不可缺少的工序。用于轧制线上的中厚板矫直机一般为辊式矫直机。为了使厚薄钢板能共用一台矫直机和提高矫直效果，矫直机最好是辊径小，辊距也小，辊子根数多。但当减少辊径时，矫直辊容易弯曲，矫直效果随之降低。因此为了克服小辊径和矫直辊弯曲之间的矛盾，现代中厚板厂都采用倾斜四重9～11辊辊式矫直机。矫直终了温度一般在600～750℃，矫直温度过高，矫直后的钢板在冷床上冷却时还可能发生翘曲，矫直温度过低，钢的屈服强度上升，矫直效果不好，而且矫直后钢板表面残余应力高，降低了钢板的性能，特别是冷弯性能。

现代矫直机矫直钢板厚度范围大，钢种多（可矫直屈服强度在 700 MPa 以上的高强度钢板），而且矫直效果好。过去矫直产品范围在 4.5～40 mm，板厚＞40 mm 钢板一般不进行矫直。而目前由于用户对板厚＞40 mm 的钢板的平直度提出了更高的要求，因此生产厂也不断扩大对厚板的矫直能力。为了矫直特厚钢板和对由于冷却不均等原因产生的局部变形进行补充矫直，在中厚板厂还设有压力矫直机，可以矫直厚度达 300 mm 的钢板，矫直压力达 5～40 MN。为矫直高强度钢板还设置了高强冷矫机，可以矫直到厚 50 mm、宽 4 250 mm的钢板。但用冷矫直机来矫直特厚钢板是不太经济的，可采用拉伸矫直机。

（6）冷却

钢板轧后冷却可分为轧后工艺冷却和轧后自然冷却两种。轧后工艺冷却是指对不同钢号的钢板根据不同的化学成分、厚度、轧制工艺和性能要求采用不同的冷却方式、冷却速度、开冷和终冷温度，以控制组织结构和综合性能，这就是控制冷却。轧后自然冷却一般是指经过矫直后的钢板在空气中的自然冷却，冷却设备是冷床。

为实现控制冷却，热轧后的钢板要在热矫前（这是多数）或热矫后进行强制冷却。强制冷却的方法很多，热矫前的冷却主要采用水幕冷却、管层流冷却和气水混合喷射冷却。对热矫后的冷却主要用水幕冷却、喷射冷却和气水混合喷射冷却。经过冷却后的钢板应尽可能的平直，尤其对那些安排在热矫直机后的冷却装置要求更严。为保证钢板的平直，下表面的冷却用水量应比上表面的冷却用水量大，其比例通常在 1:（1.5～2.5）之间。

在冷床上冷却的终冷温度在 200～150℃以下。对冷床的要求是要使钢板冷却均匀，并防止钢板表面的刮伤。

在线冷床过去一直沿用带有拉钢链和可倾倒拨爪的滑轨式冷床。这种冷床的优点是设备简单、造价低。缺点是钢板和滑轨之间的摩擦很容易造成钢板下表面的划伤，钢板和滑轨之间的接触造成钢板冷却不均匀，冷床面积的使用率较低。为了克服上述缺点，新的厚板轧机都配有新型冷床，即圆盘辊式冷床或步进式冷床。

（7）钢板表面检查

钢板表面缺陷按其来源分为两类。一类是由钢锭或钢坯（或连铸坯）本身带来的，称为钢质缺陷，如结疤、夹渣等。一类是由钢锭或钢坯到成品钢板各工序操作不当或其他原因造成的，称为操作缺陷，如刮伤、压人缺陷、氧化皮疤等。

冷却后的钢板，过去凭肉眼对上下表面进行检查（下表面要翻板后进行检查）。现在有的已开始改用反光镜与灯光检查，在操作室内就可发现钢板上下表面有无缺陷。近来由于板坯质量可靠、氧化皮清除干净、冷床设备的改进等，钢板表面缺陷已很少，因此国外个别工厂还取消了翻板检查工序，偶而发现的缺陷可离线进行补救清理。

对发现的钢板表面缺陷可根据其严重程度分别采用修磨、切除等方法处理。

（8）热处理

对力学性能有特殊要求的钢板还需要进行热处理。近年来中厚钢板生产中虽然已经广泛采用了控制轧制、控制冷却新工艺，并收到了提高钢板的强度与韧性、取代部分产品的常化工艺的效果。但是控制轧制、控制冷却工艺还不能全部取代热处理。热处理仍然用于一些产品的常化处理和低合金高强度钢的调质处理。并且热处理产品仍然具有整批产品性能稳定的优点。因此现代化的厚板厂一般都带有热处理设备。中厚板生产中常用的热处理作业有常化、淬火、回火、退火四种。前两种可以用一种热处理炉，回火温度低些，可以分开也可以与前两种共用一炉。退火炉一般是另外设立的。

（9）钢板的质量检验

对钢板质量检验的目的是验证钢板能否满足有关技术条件的要求，并正确评价其质量水平。钢板质量检查的内容包括力学性能和工艺性能检验、内部组织检验、外形尺寸检验、表面质量检验和内部缺陷的无损探伤等。其中力学、工艺性能检验和内部组织检验都要先在钢板上按规定取试样后再进行检验，其他项目则无需取样检查。各类钢板的具体检验项目由该类钢板的标准规定。

目前由于用户对钢板质量要求越来越高，并要求加强对产品的质量控制，一些产品如桥梁板要求对钢板进行探伤检查。而且有扩大探伤产品品种和逐张进行探伤的趋势。现代化厚板厂普遍安装离线连续超声波探伤仪。

某些特殊用途钢板在探伤之后还要经过酸洗、涂油或喷丸、喷漆等表面处理工序才能交货。酸洗或喷丸的目的在于去除钢板表面的氧化皮，涂油或喷漆是为了防止已去除氧化皮的清洁表面又被氧化。

4.2 热轧薄板

（1）产品规格品种及用途

热轧薄板从宽度上分为宽带和窄带，其中，宽带钢热连轧机的工艺装备、技术及产品代表了热轧薄板的最高水平。我国现有的热轧宽带钢轧机生产的产品规格为：厚度 1.2～25.4 mm，宽度 600～1 900 mm，钢卷内径 762 mm，钢卷外径（最大）2 160 mm，钢卷质量 43.6 t，单位宽度质量（最大）23 kg/mm。

热轧宽带钢产品主要以钢卷状态供给冷轧机作原料。部分热轧卷经过平整、剪切后直接供给用户。

供给冷轧机的热轧卷主要钢种为低碳钢（包括超低碳钢）、一般碳素结构钢、取向硅钢、无取向硅钢和不锈钢等。厚度为 1.5～6.0 mm，宽度为 600～1 900 mm。

直接供给用户的热轧钢卷或钢板的种类和用途比较多，主要有：

1）普通碳素结构钢。
2）优质碳素结构钢。
3）低合金高强度结构钢。
4）耐大气腐蚀和高耐候钢。
5）耐海水腐蚀结构钢。
6）汽车用钢。
7）集装箱用钢。
8）管线用钢。
9）焊接器瓶及压力容器用钢。
10）造船用钢。
11）矿用钢板。

（2）生产方法

根据产品和生产规模，热轧薄板生产主要有叠轧、炉卷和高速连轧（包括连铸连轧）等方法。

叠轧薄板是最古老的热轧薄板生产方式。它是把数张钢板叠放在一起送进轧辊进行轧制。优点是设备简单，生产灵活，能生产厚度在 0.28～1.2 mm 之间的薄板。除冷轧外，目前还没有其他轧制方法可以提供这一厚度范围的板材。这种方法的缺点也十分明显：产量、质量和成材率低，劳动强度大，成本高。因此，此种方法已经基本被淘汰。

叠轧薄板属于单张轧制，效率很低。采用成卷轧制虽然可以提高生产效率，但面临的一个重要问题是如何解决钢板温度降落过快的问题。因此出现了炉卷轧机，即将钢板卷起放置在加热炉内，一边加热保温，一边轧制。其优点是投资相对热连轧机要小，生产比较灵活，适合生产加工温度范围较窄的特殊带钢。缺点是产品质量比较差，消耗高，工艺操作比较复杂。



采用连轧方式是生产薄板带主要发展趋势。自1924年第一台带钢热连轧机投产以来，连轧带钢生产技术得到很大的发展。特别是20世纪60年代以来，由于可控硅供电电气传动及计算机自动控制等新技术的发展，液压传动、升速轧制、层流冷却等新设备新工艺的利用，热连轧机的发展更为迅速。现代热连轧机的发展趋势和特点是：

1）为了提高产量而不断提高速度，加大卷重和主电机容量、增加轧机架数和轧辊尺寸、采用快速换辊及换剪刃装置等，使轧制速度现已普遍超过15~20 m/s，高达30 m/s以上，卷重达45 t以上，产品厚度扩大到0.8~25 mm，年产可达300~600万t。

2）为了降低成本，提高经济效益，节约能耗和提高成材率成为关键问题。为此而迅速开发一系列新工艺新技术。突出的是普遍采用连铸坯及其热装和直接轧制工艺、低温加热轧制、热卷取箱和热轧工艺润滑及车间布置革新等。

3）为了提高质量而采用高度自动化和全面计算机控制，采用各种AGC系统和液压控制技术，开发各种控制板形的新技术和新轧机，利用升速轧制和层流冷却以控制钢板温度与性能。使厚度精度由过去人工控制的±0.2 mm提高到±0.05 mm，终轧和卷取温度控制在±15℃以内。

20世纪80年代末开发成功的薄板坯连铸连轧技术将板坯连铸和热连轧两个工序连接起来，实现了三高（装备水平高、自动化水平高、劳动生产率高）、三少（流程短工艺少、布置紧凑占地少、环保好污染少）和三低（能耗低、投资低、成本低）。

常规热连轧（相对连铸连轧）的生产工艺过程主要包括原料准备、加热、粗轧、精轧、冷却及卷取等工序。

（3）原料选择与加热

热连轧带钢所用的原料主要是初轧板坯和连铸板坯。由于连铸坯的前述优点，加之比初轧坯物理化学性能均匀，且便于增大坯重，故对热带连轧更为合适，其所占比重亦日趋增大，很多工厂连铸坯已达100%。热带连轧机所用板坯厚度一般为150~300 mm，多数为200~250 mm，最厚达350 mm。近代连轧机完全取消了展宽工序，以便加大板坯长度，采用全纵轧制，故板坯宽度要比成品宽度大，由立辊轧机控制带钢宽度，而其长度则主要取决于加热炉的宽度和所需坯重。板坯质量增大可以提高产量和成材率，但也受到设备条件、轧件终轧温度与前后允许温度差，以及卷取机所能容许的板卷最大外径的限制。目前板卷单位宽度的质量不断提高，达到了15~30 kg/mm，并准备提高到33~36 kg/mm。

热轧薄板板坯加热工艺及其所采用的连续加热炉型式，基本上与中厚板相类似，但由于板坯较长，故炉子宽度一般比中厚板要大得多，其炉膛内宽达9.6~15.6 m。为了适应热连轧机产量增大的需要，现代连续式加热炉，无论是热滑轨式或步进式，一方面都采用多段（6~8段以上）供热方式，以便延长炉子高温区，实现强化操作快速烧钢，提高炉子的单位面积产量；另一方面尽可能加大炉宽和炉长，扩大炉子容量。为了增加炉长，最好采用步进式炉，它是现代热连轧机加热炉的主流。

传统上常常采用将连铸成初轧坯冷却清理后再由加热炉加热到目标温度后进行轧制。若板坯不经冷却，直接加热或轧制，可以有效利用板坯的潜热，为节约热能消耗，近年来板坯热装和直接轧制技术得到迅速发展。热装是将连铸坯或初轧坯在热状态下装入加热炉，热装温度越高，则节能越多。热装对板坯的温度要求不如直接轧制严格。直接轧制则是板坯在连铸或初轧之后，不再入加热炉加热而只略经边部补偿加热，即直接进行轧制。

（4）粗轧

热带轧制和中厚板轧制一样，也分为除鳞、粗轧和精轧几个阶段，只是在粗轧阶段的宽度控制不但不用展宽，反而要采用立辊对宽度进行压缩，以调节板坯宽度和提高除鳞效果。

板坯除鳞以后，接着进入二辊轧机轧制（此时板坯厚度大，温度高，塑性好，变形阻力小，故选用二辊轧机即可满足工艺要求）。随着板坯厚度的减薄和温度的下降，变形阻力增大，而板形及厚度精度要求也逐渐提高，故须采用强大的四辊轧机进行压下，才能保证足够的压下量和较好的板形。为了使钢板的侧边平整和控制宽度精确，在以后的每架四辊轧机机前面，一般皆设置有小立辊进行轧边。

现代热带连轧机的精轧机组大都是由6~8个机架组成，形成连轧。板据粗轧机组的组成和布置上的差异，热带连轧机主要分为全连续式、半连续式和3/4连续式三大类。如图4.1-26所示。

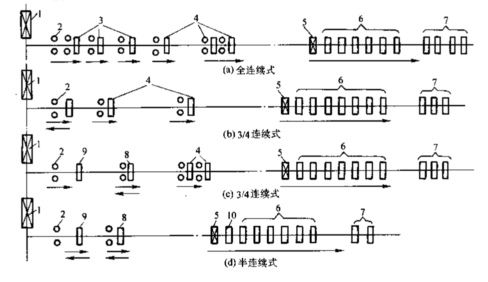


图4.1-26 带钢热连轧机的布置

1—加热炉；2—立辊除鳞机座；3—二辊不可逆万能机座；4—四辊不可逆万能机座；5—飞剪；6—四辊精轧机组；7—卷取机；8—四辊可逆万能机座；9—二辊可逆机座；10—二辊除鳞机座

粗轧阶段轧件较短，厚度较大，温度降较慢，难以实现连轧，也不必进行连轧。因此各粗轧机架间的距离须根据轧件走出前一架以后再进入下一机架的原则来确定。

随着板坯厚度和长度的增加，必然引起粗轧机架间距的

增大，使轧制流程线延长，轧件温度降增大，次生铁皮增多，带来很多不利。为了缩短机架之间的距离，粗轧机组的最后两架采用了连续式布置，两架中心距离约为 10 m。

为了大幅度提高产量，广泛采用全连续式轧机。所谓全连续就是指轧件自始至终没有逆流轧制的道次，而半连续则是指粗轧机组各机架主要或全部为可逆式而言。

全连续式轧机粗轧机组每架只轧一道，轧制时间往往要比精轧机组的轧制时间少得多，亦即粗轧机的利用率并不很高。为了充分利用粗轧机，同时也为了减少设备和厂房面积，节约投资，而广泛发展一种 3/4 连续式布置型式，它是在粗轧机组内设置 1~2 架可逆式轧机，把粗轧机由六架缩减为四架。

组轧机组各机架都采用万能式，机前都带小立辊，主要目的是用以控制板卷的宽度，同时也起着对准轧制中心线的作用。各水平辊机架和立辊机架的压下规程或轧辊开度，由计算机通过数学模型进行设定，速度规程也按一定程序进行控制，由于立辊与水平辊形成连轧关系，为了补偿水平辊辊径变化及适应水平辊压下量的变化，立辊必须能进行调速。

在粗轧机组最后一个机架后面，设有带坯测厚仪、测宽仪、测温装置及头尾形状检测系统，利用此处较好的测量环境和条件，得出较精确数据，以便作为计算机对精轧机组进行前馈控制和对粗轧机组与加热炉进行反馈控制的依据。

为了减少输送辊道上的温度降以节约能耗，近年来很多工厂还采用在输送辊道上安置绝热保温罩或补偿加热炉（器），或在轧件出粗轧机组之后采用热卷取箱进行热卷取等新技术。

（5）精轧

由粗轧机组轧出的带钢坯，经百多米长的中间辊道输送到精轧机组进行精轧。精轧机组的布置比较简单。带坯在进入精轧机之前，首先要进行测温、测厚并接着用飞剪切去头部和尾部。切头的目的是为了除去温度过低的头部以免损伤辊面，并防止“舌头”、“鱼尾”卡在机架间的导卫装置或辊道缝隙中。有时还要把轧件的后端切去，以防后端的“鱼尾”或“舌头”给卷取及其后的精整工序带来困难。

带钢钢坯切头以后，即进行除鳞。在飞剪与第一架精轧机之间设有高压水除鳞箱以及在精轧机的前几机架之前设高压水喷嘴，破除次生氧化皮。除鳞后进入精轧机轧制。精轧机组一般由 6~7 架组成连轧，有的还留出第八、第九架的位置。增加精轧机架数可使精轧来料加厚，提高产量和轧制速度，并可轧制更薄的产品。

为适应高速度轧制，必须相应地有速度快，准确性高的压下系统和必要的自动控制系统，才能保证轧制过程中及时而准确地调整各项参数的变化和波动，得到高质量的钢板。精轧机压下装置最常见的型式是电动蜗轮蜗杆式。近代发展的液压压下装置在热带连轧机也已开始采用。它调节速度快，灵敏度高，惯性小，效率高，其响应速度比电动压下的快七倍以上，但其维护比较困难，并且控制范围还受到液压缸活塞杆的限制，因此，有的轧机把它与电动压下结合起来使用，以电动压下作为粗调，以液压压下作为精调。

在精轧机组各机架之间设有活套装置。其作用，一是缓冲金属流量的变化，给控制调整以时间，并防止成叠进钢，造成事故；二是调节各架的轧制速度以保持连轧常数，当各种工艺参数产生波动时发出信号和命令，以便快速进行调整；三是带钢能在一定范围内保持恒定的小张力，防止因张力过大引起带钢拉缩，造成宽度不均甚至拉断。最后几个精轧机架间的活套支持器，还可以调节张力，以控制带钢厚度。因此，对活套支持器的基本要求便是动作反应要快，而且自动进行控制，并能在活套变化时始终保持恒张力。活套支持器可分为电动、气动、液压及气-液联合等几种（图 4.1-27）。电动式活套支持器的缺点是响应速度慢，结构及控制复杂；液压式活套支持器反应迅速，工作平稳，但维护困难；气-液联合驱动的活套支持器，可用在精轧机组最后两台轧机之间调节带钢张力。

随着机架间张力控制技术的进步，一些轧机采用了微张力无套轧制和张力 AWC（宽度自动控制）技术。

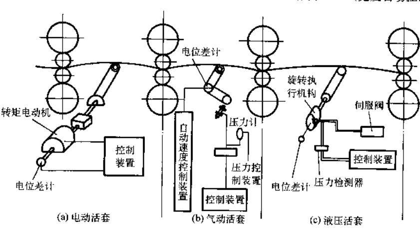


图 4.1-27　活套装置示意图

为了灵活控制辊形和板形，现代热带连轧机上皆设有液压弯辊装置，以便根据情况实行正弯辊或负弯辊。

近代热连轧机一般约每四小时换工作辊一次，全年换辊达 2 000 次以上。因此为了提高产量，必须进行快速换辊以缩短换辊时间。

为了使带钢厚度及力学性能均匀，必须使带钢首尾保持一定的终轧温度。而控制调整精轧出口速度则是控制终轧温度的最重要、最活跃和最有效的手段。实践表明，只需采用 $0.025\sim0.125\ m/s^2$ 的加速度，即可使终轧温度维持恒定范围。除调整轧制速度以外，在各机架之间还设有喷水装置，也可起一定的作用。

为了降低轧制力，减少轧制能耗，减少轧辊磨损，降低辊耗，改善轧辊表面状态，提高带钢表面质量，一些轧机的精轧机组采用了润滑轧制。

为测量轧件的温度，在精轧入口和出口处都设有温度测量装置。为测量带钢宽度和厚度，精轧后设有测宽仪和射线测厚仪。测厚仪和精轧机架上的测压仪、活套支持器、速度调节器及厚度自动调节装置组成了厚度自动控制系统，用以控制带钢的厚度精度。

（6）轧后冷却及卷取

精轧机以高速轧出的带钢经过输出辊道，要在数秒钟之内急冷到 600℃左右。然后卷成板卷，再将板卷送去精整加工。



从最后一架精轧机到卷取机只有 120 ~ 190 m 的距离，由于轧速很高，要在 5 ~ 15 s 之内急速冷却到卷取温度曾经是一个限制着轧速提高的困难问题。为了满足热轧带钢组织性能，需要采用较低的卷取温度和很高的冷却速度。为此，流量达 200 m^3/min 的低压大水量、高效率的层流冷却方法得到了广泛的应用。

经过冷却后的带钢即送往地下卷取机卷成板卷。卷取机的数量一般是 2 ~ 3 台，交替进行工作。带钢厚度不同，冷却所需要的输出辊道长度亦不同。故目前有的轧机除了考虑在距末架精轧机 190 m 处设有三台厚板卷取机以外，还在 60 m近处再设 2 ~ 3 台近距离卷取机，用以卷取厚度 2.5 ~ 3 mm 以下的薄带钢。当然也有不少轧机只在距精轧末架约 120 m 处装设三台标准卷取机。图 4.1-28 为两种常见的卷取机结构示意图，它们的主要区别是夹送辊和助卷辊的形式。

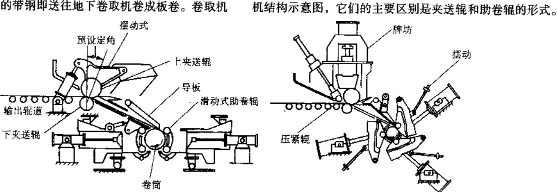


图 4.1-28　卷取机结构示意图

带钢出精轧末架以后和在被卷取机咬入以前，为了在输出辊道上运行时能够"拉直"，辊道速度应比轧制速度高 10% ~ 20%。当卷取机咬人带钢以后，辊道速度应与带钢速度（亦即与轧制和卷取速度）同步进行加速，以防产生滑动擦伤。加速段开始用较高加速度以提高产量，然后用适当的加速度来使带钢温度均匀。当带钢尾部离开轧机以后，辊道速度应比卷取速度低，亦即滞后于带钢速度，其滞后率为 20% ~ 40%，这样可以使带钢尾部"拉直"。卷取咬人速度一般为 8 ~ 12 m/s，咬人后即与轧机等同步加速。

卷取后的板卷经卸卷小车、翻卷机和运输链运往仓库，或作为冷轧原料，或作为热轧成品，继续进行精整加工。精整加工线有纵切机组、横切机组、平整机组、热处理炉等设备。

4.3　冷轧薄板

(1) 工艺特点

1) 金属的加工硬化。冷轧是在金属再结晶温度以下进行的轧制。在冷轧中，金属的晶粒被破碎且不能产生再结晶回复，导致金属产生加工硬化。由于加工硬化，使金属变形阻力增大、轧制压力升高，金属的塑性降低，容易产生脆断。当钢种一定时，加工硬化的程度与冷轧的变形程度有关，变形程度越大，加工硬化越严重。加工硬化超过一定程度后，因金属过于硬脆而不能继续轧制。因此板带经一定的冷轧总变形量之后，须经热处理（再结晶退火或固溶处现），恢复其塑性，降低变形阻力，以利于继续轧制。生产过程中每次软化热处理之前完成的冷轧工作，称之为一个"轧程"。由此可见，在一定的轧制条件下，钢的变形阻力越高，成品的尺寸越宽越薄，所需的轧程就越多。

2) 工艺润滑与冷却。冷轧采用工艺润滑的主要作用是减小金属的变形阻力、降低能耗、提高轧辊的寿命、改善带钢及钢板厚度的均匀性和表面状态，可使轧机生产厚度更小的产品。

在一定的轧制条件下，工艺润滑的效果主要取决于带人变形区润滑油量的多少（即润滑油膜的厚度）和在变形区内润滑剂的状态。带入变形区润滑油量的多少主要取决于：轧辊和轧件运动所造成的润滑油的流体动力学效果、轧辊和轧件表面凹凸不平对润滑油的"机械捕捉"作用、润滑剂对轧辊和轧件的分子吸附作用。

冷轧过程中由于轧件变形产生的变形热和由于轧件和轧辊摩擦产生的摩擦热，使轧件和轧辊温度升高。故需采用工艺冷却。现代冷轧机的轧制速度越来越高，轧制速度越高，轧件和轧辊的温升亦越高，工艺冷却就越显得重要。否则，因辊面温度过高会引起淬火层硬度下降，并有可能促使淬火层内发生残余奥氏体的分解，使辊面出现附加的组织应力。同时辊温过高也会使工艺润滑剂失效，使润滑油膜破裂，使轧制不能正常进行。水是比较理想的冷却液，因其比热大、吸热率高且成本低。油的润滑性能虽比水好，但其冷却能力则比水差得多。水的比热比油大一倍，热传导率为油的 3.75 倍，挥发潜热大 10 倍以上。由于水有如此优越的吸热性能，故它是冷轧生产的最佳冷却剂。因而在冷轧生产中，广泛采用了兼顾润滑和冷却作用的油和水的混合剂——乳化液。对这种乳化液的要求是：当以一定流量喷到轧件和辊面上时，既能有效地吸收热量，又能保证油剂以较快的速度均匀地而且确有一定数量地从乳化液中析离黏附在轧件和辊面上，以及时均匀地形成厚度适中的油膜。这是一种经济而实用的润滑冷却液，在冷轧生产中得到广泛应用。

3) 张力轧制。所谓"张力轧制"，就是轧件在轧辊中的变形是在一定值的前张力和后张力的作用下实现的。作用方向与轧制方向相同的张力叫做前张力；作用方向与轧制方向相反的张力叫做后张力。单位张力是作用在带材断面上的平均张应力。张力在冷轧生产过程中起着非常重要的作用：

① 张力在轧制中自动地调节带钢的横向伸长，使之均匀化。在张力作用下，若轧件出现不均匀伸长，则沿轧件宽度方向上的张力分布将会发生相应的变化。在伸长大的一侧，张力自动减小；在伸长小的一侧，张力自动增大。张力沿轧件宽度方向得到自动调节，调节的结果是轧件沿宽度方向纵向伸长均匀化。在整个轧制过程中，张力的自动调节在不断进行，以确保轧件沿宽度方向的伸长分布均匀，消除轧制过程中出现带材跑偏、撕裂、断带等现象。

② 张力轧制能降低轧制压力，轧制出更薄的产品。在轧制过程中，轧制压力越大，轧辊辊面的弹性压扁越大。当轧辊辊径较大、轧制压力增大到一定值时，轧辊对轧件就如同两个平板对工件的压缩。因此，在一定的轧制条件下，减小工作辊径，能降低轧制压力，但增大前后张力亦能降低轧制压力，实验表明，增大后张力较之增大前张力（指平均张应力）降低轧制压力的效果更为显著。

在现代冷轧机上都采用张力轧制，它不仅保证板带材的平坦度和更小的轧制厚度，而且可以减小轧制压力，降低能



耗。可以说，没有张力，冷轧生产就不可能顺利进行。

(2) 工艺流程

冷轧板带生产的工序和工艺流程与产品紧密相关，随产品的要求不同，工艺流程也有所不同。

冷轧板带产品以热轧带钢作为原料，因其表面有氧化皮，所以在冷轧前要把氧化皮清除掉，故酸洗是冷轧生产的第一工序。酸洗后即可轧制。若从来料到成品的变形量很大，在轧制到一定厚度时，必须进行中间退火，使带钢软化，然后继续轧制。若变形量较小，可一次轧成，不需要中间退火。退火之前由于带钢表面有润滑油，必须把油脂清洗干净，否则在退火中带钢表面形成油斑，造成表面缺陷。经过脱脂的带钢，在带有保护性气体的炉中进行退火。退火之后的带钢表面是光亮的，所以在进一步的轧制或平整时，不需要酸洗。带钢轧至所需尺寸及精度后，通常进行最终退火，为获得平整光洁的表面及均匀的厚度尺寸和调节力学性能，一般要经过平整，即进行3%以下的小变形轧制。带钢在平整之后，根据订货要求进行剪切。成张交货要横切，成卷交货必要时则纵切。

冷轧板带产品极为广泛，其具有代表性的产品有金属镀层板（镀锡板、镀锌板等）、深冲钢板（汽车板等）、电工钢板（硅钢板）与不锈钢板等。其生产工艺流程如图4.1-29所示。

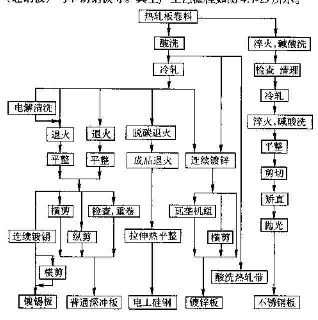


图4.1-29 冷轧薄板生产工艺流程

(3) 主要工序及其工艺

1) 酸洗。冷轧的坯料是热轧带钢，由于热轧带钢是在800～900℃以上温度条件下进行轧制的。其表面形成大约厚度为0.1 mm的氧化皮。氧化皮的结构分三层，最外层的Fe_2O_3占氧化皮厚度的10%；中间层是Fe_3O_4占总厚度的40%；内层是FeO，占总厚度的50%。外层的Fe_2O_3和中间的Fe_3O_4，结合很牢固，且中层致密。中层的Fe_3O_4和内层的FeO结合不牢固。

根据热轧板卷钢种不同，采用不同的酸洗液。普通钢一般用硫酸或盐酸，不锈钢、硅钢用硝酸、氟酸。

2) 冷轧。现代冷轧机按轧辊配置方式可分四辊式与多辊式两大类，按机架排列方式又可分单机架可逆式与多机架连续式两种。

单机架可逆式适于产品的品种规格变动频繁而每批产品的生产数量又不大，或者合金钢产品比例较大的生产情况。这种轧机生产能力较低，投资小、建厂快、灵活性大，适宜于中小型企业。

连续式冷轧机生产效率高，当产品品种较为单一或变动不多时，连轧机最能发挥其优越性。冷连轧机目前生产的规格范围：板带宽度450～2 450 mm，厚度0.076～4 mm。板据所生产产品规格，确定机架的数目。三机架冷连轧机主要用于生产厚度0.6～2.0 mm的汽车钢板，总压下率达60%。四机架冷连轧机，可生产厚度0.35～2.7 mm的产品，总压下率达70%～80%。五机架冷连轧机可生产厚度0.25～3.5 mm的产品。六机架冷连轧机专用于生产厚度可薄至0.09 mm的镀锈板。全连续冷连轧机组主要由五个轧机机座、二台开卷机、二台卷取机、焊机、飞剪以及多层活套等设备组成，见图4.1-30，可以进行连续不间断的轧制。

为生产特薄镀锡板（厚度0.065～0.15mm），专门设置了二机架式或三机架式的二次冷轧机。

3) 精整。冷轧板带的精整一般主要包括脱脂、退火、平整及剪切等工序。

① 脱脂。板带冷轧后进行清洗以去除板带表面上的油污称为脱脂。脱脂为了避免油脂在退火炉中挥发所生成的挥发物残留在板带表面形成油斑，从而影响板带的表面质量。

脱脂的方法一般有电解清洗、机上清洗与燃烧脱脂等。电解清洗采用碱液为清洗剂，通常是2%～4%的硅酸钠水溶液，外加界面活性剂以降低碱液表面张力改善清洗效果。通过碱液发生电解，放出氢气与氧气，起到机械冲击作用，从而加速脱脂过程。对于一些使用以矿物油为主的乳化液作为工艺润滑剂的冷轧，则在轧制的最后道次喷以除油清洗剂，这种方法称之为“机上洗净法”（又称去油轧制）。

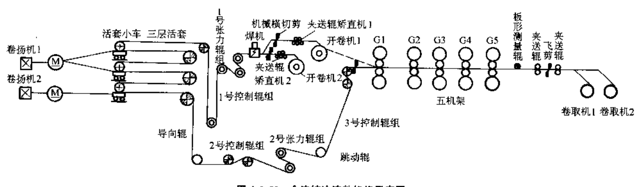


图4.1-30 全连续冷连轧机组示意图

② 退火。退火有初退火、中间退火和最终退火（成品退火）。

初退火是为冷轧做准备，使带钢具有良好的塑性和一定的组织。初退火主要用于含碳量较高的碳素结构钢、合金结构钢等。初退火工艺制度因钢质不同而不同，一般在640～750℃，保温十多小时。初退火可降低热轧板卷的硬度、消除粗晶组织，提高塑性，以利于冷轧。因初退火是在酸洗前进行，因此初退火一般可不采用保护气体。



中间退火是为消除加工硬化，以利下一步轧制。中间退火一般都是在保护气氛中进行光亮退火。

成品退火通常是使板带进行恢复、再结晶及晶粒适当长大以改善其加工性能，此处也要根据生产板带品种的最终性能要求。如有的板带是为获得良好深冲压性能，而有的板带则专为脱碳及产生二次再结晶而进行退火的（如硅钢片）。

③平整。平整实质上是采用小压下率（0.3%～3%）的冷轧；经过平整后的板带可以消除屈服平台，在带钢平整后相当长的一段时间内表面不出现冲压“滑移线”（即吕得斯线）。同时使板带的屈服强度达到最低，从而提高板带的成形性能。

平整可改善板形，提高板带的平坦度。为此，平整机的轧辊直径应尽量选大一些有利。此外通过选用经过不同处理的辊面轧辊进行平整，可以得到不同要求的板带表面。通过调整平整的压下率，可使板带的力学性能在一定范围内变化，以适应不同用途的要求。通过双机架或二机架平整还可实现较大的压下率，以便生产超薄的镀锡板。

经热处理后的普通板带、镀锡板、汽车板等均需进行平整。

平整时对汽车板带要求采用喷砂辊平整，以获得具有均匀粗糙度的麻面板，利于冲压加工或涂漆。用于镀、涂层的原板，应采用抛光辊平整，以提高板面光亮度，利于提高镀层质量，降低镀层金属消耗。普通钢板采用研磨的轧辊进行平整。

5　板带轧制质量与性能控制

5.1　厚度控制

（1）影响厚度的主要因素

1）空载辊缝。板带轧件在两个工作辊形成的辊缝之间发生塑性变形，在忽略轧机出辊缝后的弹性恢复情况下，辊缝的形状和大小基本决定了轧件的横截面形状。与轧件横截面形状不规则的现象一样，沿轧辊轴线上的辊缝大小也是不同的，多数情况是中间大、两侧小。一般用辊缝中点的大小代表辊缝的名义大小，它对应轧件中心线处的厚度，称名义厚度。有时也用平均辊缝表示辊缝的大小，同样，用平均厚度表示轧件的名义厚度。

空载辊缝是不考虑因轧制载荷（主要是轧制力）引起的轧机变形情况下的辊缝。轧制时，要根据厚度的要求进行设定和调整，但是由于轧机本身的特点，诸如轧辊的偏心、轧辊的椭圆度、轧辊的磨损、轧辊的热胀冷缩、轧辊平衡力的波动、轧机的振动、油膜轴承的油膜厚度等都会对空载辊缝产生不希望的变化。

2）刚度。当轧机承受轧制力等载荷时，那些传递载荷的轧机构件将会发生弹性变形，从而使辊缝产生额外的变化，这种变化加到空载辊缝上，形成了接近轧件真实截面形状的有载辊缝（或称受载辊缝，负荷辊缝）。

轧机的变形主要有两类：一类是轧辊的弯曲与压扁；另一类是轧机构件的压缩或拉伸，这些构件包括轧辊轴承及轴承座、压下螺钉（或液压缸）及附件、轧机机架等。这些变形不仅与构件的结构尺寸及载荷的大小有关，轧辊的凸度、轧件宽度等对其也有影响。

轧制力与辊缝变化之间的关系称为轧机的纵向刚度，简称刚度，表示为：

$$K=\frac{\Delta P}{\Delta f} \tag{4.1-42}$$

式中，K 为轧机的刚度系数；ΔP 为轧制力的变化；Δf 为轧机弹性变形引起的辊缝变化。

刚度系数 K 越大，表示轧机抵抗变形的能力越大，辊缝受轧制力波动的影响越小，轧件厚度对轧制力的变化越不敏感。

轧机刚度系数一般采用实测的方法确定。

① 轧制法。在一定的原始辊缝下，轧制不同厚度的轧件，测量轧制力 P 和轧后的轧件厚度 h，厚度 h 与原始辊缝之差即为轧机的弹性变形 f。将 h 与轧制力 P 之间的关系绘制成曲线，即得轧机的弹性变形曲线，称弹跳曲线，见图 4.1-31。这种测量刚度的方法与实际生产情况最为接近，但不可能在实际生产中经常进行。

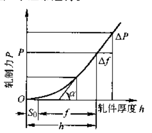


图 4.1-31　轧机的弹性变形曲线（弹跳曲线）

② 压靠法。轧辊间没有轧件，只需使工作辊与工作辊直接接触压靠，一边转动轧辊，一边继续压下，记录压下量与压下力之间的关系，绘制弹性变形曲线。用这种方法测定时轧制负荷可以由空载变化到最大轧制力，且轧辊线速度可以取额定速度。但要注意，随压下力大小的变化，沿轧辊辊身载荷分布也发生变化。此外，由于没有咬入轧件，两个工作辊之间完全接触，这与实际轧制情况有所不同。所测得的轧机刚度要比实际轧制情况下刚度值高。

由弹跳曲线可见，在轧制力不大时，轧机弹性变形与轧制力之间是曲线关系，这是因为轧机各零件间存在一定的间隙以及接触不均匀，不过这一段比较短。随着轧制力的增加，间隙和接触不均匀的影响消除，轧机的弹性变形与轧制力成为了直线关系，该直线的斜率就是轧机的刚性系数，即 $K=\frac{\Delta P}{\Delta f}=\tan\alpha$。

3）轧制力。有载辊缝与轧制力有关，故影响轧制力的因素都会引起厚度的变化。

① 轧机入口板带的厚度、温度和成分的波动。轧件温度变化的主要原因是，加热炉中产生的炉轨黑印和轧件在中间辊道运行过程中由头到尾的温度降。温度和成分的变化会改变轧件的变形阻力。

② 轧件形状，包括宽度、平坦度、头尾端部形状等的变化，改变了轧件的宽度以及轧制力沿轧辊辊身的分布。

③ 施加前后张力可使平均单位压力降低，导致轧制压力下降。

（2）厚度控制理论

1）弹跳方程。如前所述，板带的厚度与原始的空载辊缝和轧机的弹性变形有关。由图 4.1-31 可以得出轧后轧件的厚度：

$$h=S_0+f \tag{4.1-43}$$

式中，h 为轧后的轧件厚度，简称轧件厚度；S_0 为轧辊的原始辊缝；f 为轧机的弹性变形。

由于实际轧制过程中的轧制力比较大，一般都在弹跳曲线上的直线区，而弹跳曲线的非线性部分很短，所以，整个弹跳曲线可以近似为一条直线。此时，轧件的厚度可近似地表示为：

$$h\approx S_0+\frac{P}{K} \tag{4.1-44}$$

式中，P 为轧制力。

2）塑性曲线与塑性方程。本章第 2 节给出了忽略轧件宽展和不考虑轧辊弹性压扁条件下的轧制力计算公式：

$$P = p_m b\sqrt{R\Delta h} = p_m b\sqrt{R(H-h)} \qquad (4.1\text{-}45)$$

式中，p_m 为平均单位压力；b 为轧件宽度；H 为轧件轧前厚度（入口厚度）；h 为轧件轧后厚度（出口厚度）；Δh 为轧件的压下量，它是轧前和轧后的轧件厚度差，$\Delta h = H - h$；R 为轧辊半径。

显然，上式中的轧制力 P 与轧件出口厚度 h 之间为非线性关系，如图 4.1-32 所示的曲线，称该曲线为轧件的塑性变形曲线，简称塑性曲线。但是，从图中可以看出，在相当宽的范围内，轧制力 P 与轧件出口厚度 h 之间基本是线性关系，只在变形量较小或较大时，轧制力与轧件出口厚度 h 之间才呈曲线变化。

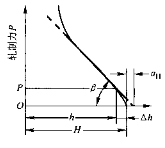


图 4.1-32　轧件塑性变形曲线（塑性曲线）

在一般情况下，采用很小或很大压下量轧制的情况很少，实际多在线性区，这时的塑性曲线可以近似为直线。此时的轧制力 P 可表示为：

$$P = Q(\Delta h + a_H) \qquad (4.1\text{-}46)$$

式中，Q 为轧件的塑性刚度系数，$Q = \tan\beta$；a_H 为塑性曲线直线段延长线与横坐标交点离开塑性曲线原点之间的距离，当轧件原始厚度 H 大于 10 mm 时，a_H 可近似认为等于零。

式（4.1-46）称作塑性方程。塑性刚度系数 Q 反映了轧件变形的难易程度，它与轧件厚度、张力、变形阻力和摩擦系数等一系列因素有关。一般来说，轧件厚度和张力越小，Q 值越大；变形阻力和摩擦系数越大，Q 值也越大。

由塑性曲线可以看出，塑性刚度系数 Q 越大，塑性曲线的斜率越大。轧件的原始厚度 H 则会改变塑性曲线起始点的位置。H 增大时，起始点的位置右移。

3）弹塑曲线（$P-H$ 图）。轧机的弹跳曲线与轧件的塑性曲线及其方程从不同方面反映了轧制力与轧件厚度的关系。将塑性方程与弹跳方程联立求解，就可以得到轧后的轧件厚度 h 或原始辊缝 S_0 及对应的轧制力 P。如果采用图解法，将弹跳曲线与塑性曲线绘制在同一个 $P-H$（h）坐标系下，即得到弹塑曲线，称 $P-H$ 图，见图 4.1-33。两曲线交点的坐标值即为轧后的轧件厚度 h 和对应的轧制力 P。

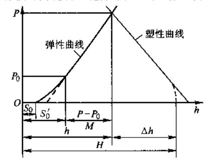


图 4.1-33　轧机弹塑曲线（$P—H$ 图）

$P-H$ 图表示了机座的弹性变形、空载辊缝以及轧件轧前轧后厚度、轧制力等因素的关系，简单直观，是研究轧件厚度波动及厚度控制的主要工具。

4）引起厚度变化的原因。由弹跳方程可知，轧后的轧件厚度主要取决于空载辊缝、轧制力和刚度系数这三个因素。因此，研究厚度波动的原因以及调控手段也应从这三个方面人手。

① 空载辊缝。由图 4.1-34 所示，当空载辊缝由 S_0 变化到 S_{01} 或 S_{02} 时，弹跳曲线由 A 平移到 A_1 或 A_2，轧件厚度由 h 变化到 h_1 或 h_2。轧辊的偏心、磨损和热膨胀，以及轴承油膜厚度的变化都会引起空载辊缝的变化，造成轧件厚度的变化。但另一方面，空载辊缝可以通过调整压下的方式进行人为干预，达到改变轧件厚度的目的。事实上，调整辊缝已成为厚度控制的主要手段。

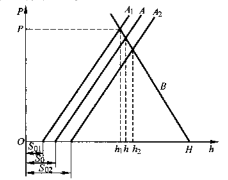


图 4.1-34　空载辊缝变化对轧件厚度的影响

针对工作机座的弹性变形，对厚度控制提出了两项要求：一是根据产品厚度，确定考虑了工作机的弹性变形的空载辊缝，使实际轧出的厚度与目标厚度一致。二是对因各种因素引起的弹性变形变化进行补偿，以减少其对厚度的影响，使板带在长度方向的厚度波动在允许的范围内。

② 轧制力波动对轧件厚度的影响。轧制力的波动是造成厚度波动的主要因素，所有影响轧制力的因素，如轧件原始厚度、出口和入口张力、轧件的变形阻力（与轧件的温度与成分有关）以及轧件和轧辊间的摩擦系数等，都会使轧出的厚度发生变化。

轧件原始厚度变化主要使 $P—H$ 图上塑性曲线的位置发生变化，如图 4.1-35a 所示。设原始厚度 H 减小，从 H_1 变为 H_2，则塑性曲线 B 左移，导致轧制力减小，使轧件厚度从 h_1 减小为 h_2。

张力 T 和摩擦系数 μ 的波动都会引起轧件应力状态的变化，影响变形阻力。张力增大和摩擦系数减小均会降低轧制力，在 $P—H$ 图上表现为塑性曲线的斜率小，轧件厚度 h 变小，见图 4.1-35b 和图 4.1-35c。在连轧机或可逆式带钢轧机上，常通过调整轧机的前后张力对厚度进行控制。

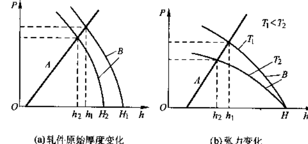
轧件温度和成分的变化同样会影响变形阻力，在 $P—H$ 图上同样表现为塑性曲线斜率的变化。其对厚度的影响与图 4.1-35 中的 b 和 c 的情况相似。

5）厚度控制原理。以原始厚度变化为例，结合 $P—H$ 图，说明厚度的控制原理。

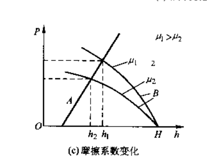
如图 4.1-36 所示，设轧件的入口厚度为 H_1，辊缝为 S_1，这时的轧制力为 P_1，出口厚度是 h_1。当入口厚度增大到 H_2 时，引起出口厚度增加，变为 h_2，引起的轧制力增加值与入口厚度的变化量有关。这时对辊缝进行压下调整，由 S_1 调整到 S_2，使出口厚度仍回到原来的 h_1。与调整前相比，辊缝减小，轧制力增加，但出口厚度维持不变。

对于张力、摩擦系数及变形阻力波动的情况，其厚度控





(a)轧件原始厚度变化　　(b)张力变化



(c)摩擦系数变化

图 4.1-35　轧制力的波动对轧件厚度的影响

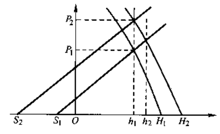


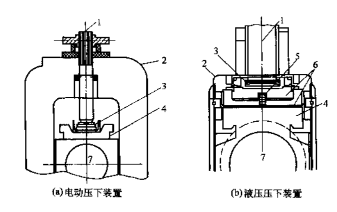
图 4.1-36　原始厚度不均时的厚度控制原理

制原理基本相同。

（3）辊缝调整机构

厚度控制主要通过调整辊缝实现。辊缝调整机构一般放置在机架的上方，驱动上辊系向下运动对轧件施加压力（轧制力），故称作“压下”。也有一些轧机的辊缝调整机构放置在辊系的下方，这时辊缝的调整动作为“压上”。由于压下和压上的作用相同，一般统称为“压下”。根据结构，辊缝调整机构可以分为电动式和液压式两大类。

1）电动压下。常见的电动式压下采用的是螺钉、螺母结构，见图 4.1-37a。压下螺母固定在机架牌坊的横梁内，螺钉通过蜗轮蜗杆由电机驱动旋转，实现压下。



(a)电动压下装置　　(b)液压压下装置

图 4.1-37　压下装置示意图

1—压下螺钉；2—机架牌坊；3—压力块；4—支承辊轴承座；5—位移传感器；6—压下液压缸；7—支承辊

电动式压下的优点是辊缝的调整范围可以很大，缺点是传动效率低、运动部分转动惯量大、反应速度慢、调整精度低等，因此主要用于调整速度和精度要求不高、调整行程比较大的轧机上，如初轧机、中厚板轧机以及热连轧机组的粗轧机架上。早期热连轧机组的精轧机架也采用的是电动压下。

2）液压压下。为了获得高精度的辊缝控制，在电动压下的压下螺钉和支承辊轴承座之间增设一个液压压下缸，见图 4.1-37b，通过液压伺服系统，可以实现高响应、高精度的的位置控制，使板带的厚度精度大幅度提高。液压缸的行程有 3 种：短行程（小于 50 mm）、中行程（大于 50 mm，小于 200 mm）、长行程（大于 200 mm）。

有些轧机，如带钢冷轧机，取消了电动压下装置，将液压压下缸直接安装在机架牌坊横梁与支承辊之间。

液压压下装置除了液压缸以及与之配套的伺服系统外，还装有高精度的位移计等仪表以及计算机控制系统。与电动压下相比，液压压下使得压下机构大为简化，同时具有响应速度高，调整精度高，机械结构简单等优点。因此在高精度的板带轧机，如冷轧机和热轧机组的精轧机架上得到了广泛的应用。

3）电动液压复合式。为了分别发挥电动压下调整行程大以及液压压下速度快、精度高的特点，有些轧机同时具有电动和液压两种压下机构，见图 4.1-37。其中的电动部分用来对辊缝进行粗调辊缝开度的闭合，而辊缝的微调则是由液压压下来实现。这种结构多在中厚板轧机上采用。

（4）厚度自动控制系统

在轧制过程中，许多因素都会引起辊缝和轧制压力的变化，造成轧件厚度的波动，使轧件在长度方向产生厚度偏差（纵向厚差）。为了控制这种偏差，在冷轧、热轧带钢轧机以及中厚板轧机上，广泛采用了厚度自动控制系统（简称 AGC—Automatic Gauge Control）。它通过测厚仪、位移传感器和压力传感器等对影响厚度的因素（如辊缝位置、轧制压力等）及轧件的实际轧出厚度进行连续检测，经比较处理后发出控制信号，调整压下、张力或轧制速度等，把轧件的厚度波动控制在允许的范围内。

AGC 系统主要由以下三个部分组成。

① 测厚。即利用测厚仪直接测量轧件的厚度，也可以由实测的轧制压力利用弹跳方程间接得到辊缝处轧件的厚度。

② 厚度比较和调节。将检测到的轧件厚度与轧件的给定厚度进行比较，得出厚度偏差值，然后经过计算，求出辊缝的调整量，发出辊缝调整信号。

③ 辊缝调整。根据辊缝调整信号，通过电动压下（称电动 AGC）或液压压下（称液压 AGC）装置调整辊缝，以减少或消除轧件的厚度偏差。

一个完整的厚度自动控制系统具有许多的控制功能，其中最主要的是压下位置控制（简称 APC—Automatic Position Control）、轧制压力变化补偿（即机座当量刚度的控制）、测厚仪监控、前馈控制及张力控制等，油膜厚度变化补偿、轧辊偏心补偿、加减速过程厚度补偿也成为提高厚度精度的有效辅助控制方式。

1）AGC 的主要类型。依据压下机构形式，AGC 系统可以分为电动 AGC 和液压 AGC 两类；依据轧件厚度的测量方式，AGC 系统可以分为以下三类：

① 直接测厚式 AGC。在距离轧机出口一定距离处测量轧后的轧件厚度。测量系统复杂但控制系统简单。由于测量处的轧件情况不一定与辊缝处的轧件情况相同，即测量存在较大的滞后性，导致控制精度不高。

② 间接测厚式 AGC。利用测压仪测量轧制力，根据弹跳方程可以间接得出轧件的厚度。这是目前广泛采用的一种方式。这种方法简单，时间滞后较小。因是间接测量，精度也较低，但可利用轧机出口的测厚仪的测量结果进行矫正。

③ 预控 AGC。在轧机入口处设置测厚仪，测量入口厚度 H，计算入口厚度的波动，根据轧机的弹跳方程和轧件的塑性方程计算轧件将要产生的厚度偏差以及消除该偏差需要的辊缝调整量。最后根据检测处轧件进入辊缝的时间，以及调整辊缝需要的时间，通过压下机构对辊缝进行"预控"调整。

直接测厚式 AGC 和间接测厚式 AGC 属于闭环反馈控制系统。预控 AGC 属于开环控制，其控制精度主要取决于计算精度。为了提高精度，预控 AGC 往往与直接测厚式 AGC 和间接测厚式 AGC 联合使用。

2）AGC 的主要功能

① 监控。利用轧机出口的测厚仪测量轧件的厚度并计算厚度偏差，将偏差反馈到本机架或更前面的机架，对厚度进行调整。

② 前馈。将连轧机组的任意机架出口板厚偏差和轧件的变形阻力前馈到下一机架，用于板厚控制。对于可逆轧机，是将前一道次轧制时测得的厚度数据储存起来，用于下一道次的控制。

③ 头尾补偿。因穿带时前张力为零，抛尾时后张力为零，轧制力会出现变化进而影响厚度，所以要对头尾无张力作用的部分进行厚度补偿。

④ 张力调整。根据厚度偏差信号调整张力，达到控制厚度的目的。张力的调整通过改变轧机的速度或活套支撑器的位置来实现。要注意的是，张应力值不可过大，以免造成板宽变化甚至断带。

⑤ 速度补偿。连轧机进行厚度控制时，会造成机架之间的金属秒流量的不平衡，造成张力变化甚至失控。这时要修正轧辊的转速，保持第 i 机架出口的带材速度与第 $i+1$ 机架入口的带材速度一致。热连轧机组精轧机架中的活套支撑器也有修正秒流量不平衡的功能。

⑥ 轧辊偏心补偿。轧辊偏心对厚度的影响是周期性的，可以采用液压压下机构的周期性压下来消除。

⑦ 油膜补偿。轧机油膜轴承的油膜厚度与轧辊的转速有关，可以根据轧制速度对油膜厚度进行补偿。

⑧ 弯辊力补偿。弯辊力用于板形的控制。在调整板形时也会带来轧机负荷（作用在压下机构上的力）的变化，并带来轧机弹性变形的变化。所以要通过调整压下进行补偿。这对于轧制力与弯辊力相差不大的热轧机以及冷轧平整机上尤为重要。

⑨ 轧辊热变形补偿。轧制中，轧辊的受热膨胀和冷却收缩变形也需要进行补偿。

（5）厚度测量

板带的在线厚度测量有接触式和非接触式两种。接触式一般用于速度较慢的中厚板轧机上，精度不高。在高速轧机上，一般采用非接触式，主要有激光式和射线式两种。

在中厚板轧机上，可以采用激光式，即在板的上下设置激光测距仪，分别测量板于上下表面与参考点的距离，经比较计算后得到板的厚度。对于带钢轧机，一般采用射线式，其原理是：从射线源向轧件发射高强度射线（X 射线或 γ 射线），射线穿过轧件时会衰减，通过比较衰减前后的射线强度计算轧件厚度。X 射线的衰减公式为：

$$I = I_0 \exp(-\mu h) \tag{4.1-47}$$

式中，I_0 为衰减前的射线强度；I 为衰减后的射线强度；μ 为材料的对射线的吸收系数；h 为轧件厚度。

某热连轧机的 X 射线测厚仪的测量范围为 1 ~ 17.5 mm。典型的冷带钢轧机的 X 射线测厚仪的测量范围为 1 ~ 8 mm。

5.2 板形控制

（1）板形良好条件

如本章 2.4 小节所指出的，板形包括平坦度、横截面形状和平面几何形状。板形控制主要是指平坦度和横截面形状的控制。

板形不良不仅不能满足用户需要，严重时会导致勒辊、轧卡、断带、撕裂等事故的出现，使轧制无法正常进行。

横截面形状可以用横向厚差来表示，它是指板带沿宽度方向的厚度差。凸度、楔形以及边部减薄等都是表示横向厚差的参数。从用户的角度来看，最好是横向厚差为零。但这在目前的技术条件下还不可能达到。此外，在无张力或小张力轧制时，为了保证轧件运行的稳定，轧件能够自动对中不致跑偏，也要求轧制时的实际辊缝呈现中间大、两侧小的凸形。当然从技术上还是要求尽量减少这种厚差。为了便于分析，以下用凸度代表横向厚差进行讨论。

在厚度较小的情况下，金属的横向流动不大，板带轧制可以看作是平面变形。假设来料平坦度良好，只要沿宽度上，各处的伸长系数 λ 相等，就不会出现因伸长不一致导致的平坦度缺陷。

如图 4.1-38 所示，设轧制前板带边缘的厚度等于 H，面中间厚度等于 $H+CH$，即轧前凸度为 CH；轧制后相应横断面上的厚度分别为 h 和 $h+Ch$，即轧后凸度为 Ch。令边缘和中间的延伸系数 λ 相等：

$$\frac{H+CH}{h+Ch} = \frac{H}{h} = \lambda$$

由此可得：

$$\frac{CH}{Ch} = \frac{H}{h} = \lambda \tag{4.1-48}$$

得到凸度与厚度的比值：

$$\frac{CH}{H} = \frac{Ch}{h} \tag{4.1-49}$$

式中，$\frac{CH}{H}$为轧前的比例凸度；$\frac{Ch}{h}$为轧后的比例凸度。

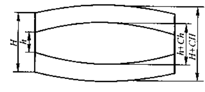


图 4.1-38　轧制前后板带截面形状

由此可见，要使轧件均匀伸长，平坦度良好，必须保证轧制前后的比例凸度不变。比例凸度不变也称作平坦度良好条件。比例凸度不变的几何含义是，轧制前后，厚度发生了变化，但横截面形状保持相似性。这样，对于多道次轧制，随着厚度的减小，凸度也应按比例减小。

对于多道次可逆轧制，由于轧辊的辊形在前后道次中几乎是不变的，为了满足均匀变形条件，需要通过逐道次降低轧制力来减小轧辊的弯曲变形，达到降低辊缝凸度的目的。这是可逆轧机制定压下规程时需要遵循的原则之一。

需要指出的是，保持平坦度良好的比例凸度不变原则是在轧件不发生金属横向流动的假设下得出的，这在轧件较厚的情况下不一定成立。尤其中厚板及带钢热连轧的粗轧道次，这时的轧件较厚，温度较高，宽度各处的不均匀压缩可能通过金属横向流动转移而得到补偿，不会全部变成不均匀



的伸长。所以，厚轧件对不均匀变形的自我补偿能力较强，不容易出现平坦度问题。

而对于冷轧和热连轧的精轧阶段，特别是轧制较薄的板带时情况就不一样，此时轧辊与轧件之间的摩擦力对金属横向流动的阻碍较大，亦即对于不均匀压缩变形的自我补偿能力很差。并且由于厚度较小，绝对压下量的微小差异也会引起比例凸度的显著变化。即厚度越小，对不均匀变形的敏感性就越大。故为了保证良好的平坦度，就必须遵循均匀变形或比例凸度不变的原则。

Shohet 对以上问题进行了试验研究，给出了板形判别式：

$$-40\left(\frac{h}{b}\right)^{1.86} < \frac{Ch}{h} - \frac{CH}{H} < 80\left(\frac{h}{b}\right)^{1.86} \quad (4.1\text{-}50)$$

式中，b 为轧件宽度。

该式限制了每道轧制比例凸度可以改变的量。若比例凸度的变化量低于下限时，会产生中浪；若比例凸度的变化量高于上限时，会产生边浪。

以上分析凸度与平坦度的关系，其结果反映了横向厚差与平坦度之间关系的主要特征，因此具有典型意义。

需要指出，在板带的边部，由于缺少侧向约束，金属容易产生横向流动，可以不必保持形状相似。

综上所述，板带的横截面形状或横向厚差与平坦度是板形的两个方面，改变横向厚差的同时会导致平坦度的变化，板形控制是通过横向厚差的控制来实现的。

因此，板形的控制应该贯穿整个的轧制过程：厚度较大时，不易出现平坦度缺陷，板形控制的目标是横向厚差（凸度）；厚度较小时，横向厚差就不能作为控制目标，需要控制的是平坦度。例如在具有 7 个机架的热连轧精轧机组，前 3 个机架称作上游机架，控制目标为凸度，后 4 个机架称作下游机架，控制目标为平坦度。

（2）板形控制的理论与方法

如前所述，控制板形是通过控制横向厚差来实现的，而横向厚差取决于轧制时实际辊缝的形状。而辊缝形状则由工作辊的几何形状（辊形）、工作辊的相对位置以及轧辊的弹性变形决定。因此，板形控制要通过这三个方面入手。

1）工作辊的弹性变形及控制。轧辊的弹性变形包括弯曲和压扁。

图 4.1-39 表示的是二辊轧机的上辊受力情况。轧辊在轧制压力 P 和轴承座处支反力 P_b 的作用下发生弯曲变形，其中 $P = P_b$。弯曲变形使辊缝呈现中间大、两侧小的趋势，导致轧件凸度增加。该变形的求解比较简单。

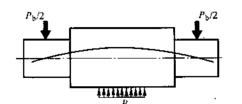


图 4.1-39 二辊轧机轧辊弯曲变形示意图

如图 4.1-40 为四辊轧机的轧辊弯曲情况。工作辊承受了三个力：使轧件产生变形的轧制力，弯辊力 F，与支承辊接触形成的接触压力。由于弯辊力的存在，支承辊轴承座处的支反力 P_b 与轧制力 P 是否相等，取决于弯辊力的大小以及弯辊装置的具体结构形式。

由于工作辊与支承辊之间作用力的分布与它们各自的弯曲变形以及相互的压扁变形有关，而力的分布又是确定这些变形的条件，因此，四辊轧机的变形求解比二辊轧机复杂

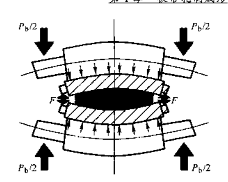


图 4.1-40 四辊轧机轧辊弯曲变形示意图

得多。

对于四辊轧机，作用在工作辊上有轧制力和辊间接触压力。在轧制力不变的情况下，要控制工作辊的弯曲，或者调整辊间接触压力，或者在工作辊上施加其他的力，具体如下。

① 液压弯辊。加大四辊轧机工作辊的平衡力，就出现了现在广泛采用的液压弯辊技术。液压弯辊是在工作辊两端的轴承座上施加弯辊力，使工作辊产生需要的弯曲变形。因液压弯辊具有调整速度快、调整灵活、调节范围大等优点，已成为板形控制的基本手段。

根据弯辊力 F 的作用方向，分正弯和负弯两种，见图 4.1-41。正弯的弯辊力与轧制力的方向相同（图 4.1-40），其作用是降低辊缝凸度。负弯的弯辊力与轧制力的方向相反，其作用与正弯正好相反。

轧制力使工作辊出现导致轧件凸度增大的弯曲变形，而正弯辊可以减小轧件的凸度，甚至出现负凸度。在轧辊原始凸度较大时，采用负弯辊力以增大轧件的凸度。

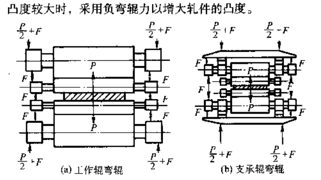


图 4.1-41 液压弯辊方法

当工作辊辊身长度 L 与辊径 D 之比 L/D 为 3.5～4 时，由于工作辊的刚度不够，弯辊只对工作辊的两端有效，这就需要采用支承辊弯辊方式（图 4.1-41b），这种方式很少采用。

② 改变辊间接触压力。改变工作辊与支承辊之间接触压力有两个途径，一是改变接触压力的分布形式，二是改变接触区长度。

改变辊间压力分布的有效方法是改变支承辊的辊形和弯曲变形，具体方法有：a）采用支承辊弯辊；b）采用带凸度的支承辊。

改变接触区长度的主要思想是消除有害接触区。如图 4.1-42a 所示，支承辊与工作辊沿辊身全长接触，在轧件宽度 B 以外区域 A 的接触压力是使工作辊产生弯曲的主要原因。区域 A 称有害接触区，它的存在一方面加大了工作辊的弯曲变形，另外使工作辊的弯曲对轧制力的波动十分敏感。减小或消除有害接触区不仅可以解决这两个问题，同时可以提高液压弯辊的效果。具体有以下方法：

a）阶梯辊。设想将支承辊加工或图 4.1-42b 所示的双阶梯形状就可以完全消除有害接触区。但固定的阶梯长度不能



(a) 普通工作辊　(b) 带阶梯的工作辊

图 4.1-42　四辊轧机辊系受力图

适应带钢宽度的变化，所以这种方法并不实用。

b) HC 轧机。图 4.1-43 为六辊 HC（High Crown）轧机，它在四辊轧机的工作辊与支承辊间增加一根可轴向移动的中间辊。当中间辊端部移动到与板边对齐的位置时，可以使原来的 4 个有害区减少 2 个，同时还可以提高弯辊力的效果。

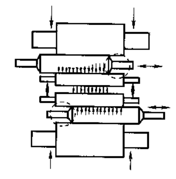


图 4.1-43　六辊 HC 轧机

HC 轧机的工作辊、中间辊和支承辊一般都不带凸度，所以辊形简单，加工方便。为了减轻压力尖峰，可以把中间辊的端部加工成圆滑的曲线。

c) 变接触支承辊。变接触支承辊（简称 VCR—Varying Contact Rolls）与阶梯辊类似，但支承辊辊形曲线是光滑连续的。辊身中部曲线变化平缓，两端变化剧烈，正确的曲线设计可保证工作辊与支承辊间的接触线长度能自动适应轧件宽度的变化。采用这种辊形可以减小或消除所有 4 个有害接触区。图 4.1-44 是用于某热连轧机七机架精轧机组的支承辊辊形曲线。

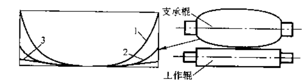


图 4.1-44　变接触支承辊辊形

1—前 3 个机架 VCR 辊形；2—后 4 个机架 VCR 辊形；3—常规辊形

除以上方法外，其他方法，如工作辊弯辊、工作辊辊形等，也会改变辊间的压力分布。

③ 弹性压扁及控制。工作辊在与支承辊的接触区所发生的弹性压扁并不直接影响辊缝，但与轧件接触区域出现的压扁却对会辊缝产生直接的影响，具体可以从以下三个方面分析：

a) 一般情况下，轧制力沿工作辊辊身方向的分布是不均的，这会导致轧辊弹性压扁分布的不均，进而影响辊缝凸度，但其影响很小。

b) 在板带边部区域，由于外区的影响，轧辊的弹性压扁变形要小些，导致轧件出现边部减薄。在其他条件相同的情况下，减小工作辊的直径可以减轻边部减薄现象。

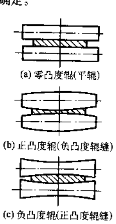
c) 在板带边部，由于缺乏侧向约束，轧件的平均单位压力较低，导致该区域的轧制力和工作辊压扁都小于其他区域。这是导致边部减薄的另一个原因。

因此，工作辊的弹性压扁对轧件的凸度和边部减薄都会产生影响。

工作辊弹性压扁的控制主要是针对边部减薄，方法主要有两个，一是减小工作辊的直径；二是采用一端带锥度的工作辊，补偿因压扁造成的板带边部减薄。

2) 工作辊辊形及控制。改变工作辊辊形能够直接带来辊缝的变化。对于四辊轧机，工作辊辊形的改变也使它与支承辊间的压力分布发生变化，对工作辊的弯曲变形产生影响。

① 原始辊形设计。在没有负荷的情况下，圆柱形的工作辊所形成的空载辊缝是个矩形（见图 4.1-45a）。由于轧辊在轧制力的作用下会发生弯曲变形，辊缝呈现中间大、两侧小的凸形，进而改变轧件的凸度。为了补偿这个凸度，一般将工作辊预先加工（采用磨削的方法）成中间大、两端小的凸形辊，其直径差称轧辊凸度。凸度值的大小要根据轧辊可能发生的弯曲变形确定。


(a) 零凸度辊(平辊)

(b) 正凸度辊(负凸度辊缝)

(c) 负凸度辊(正凸度辊缝)

图 4.1-45　简单凸度工作辊的空载辊缝

在带钢热轧机上，轧辊的热膨胀也能使轧辊出现凸度，称热凸度。当热凸度大于轧辊弯曲变形对辊缝的影响时，需要将轧辊加工成中间小、两边大的凹形，即负凸度辊（见图 4.1-45c）。

因此，原始辊形要根据轧制力的大小和变化、轧件的宽度和厚度、轧辊可能发生的磨损以及热膨胀等因素进行设计。

② 轧辊的热膨胀。轧制过程中，特别是在热轧中，工作辊因受热膨胀产生热变形，使辊形发生变化。轧辊的热变形是一个复杂的热传导问题，应考虑的因素有：a) 轧件的温度及热容量；b) 轧件的变形热以及轧辊与轧件摩擦产生的热量；c) 通过接触轧件传给轧辊的热量；d) 通过辐射传给轧辊的热量；e) 通过冷却液或周围空气从轧辊表面带走的热量；f) 传给轧辊两端轴承、轴承座的热量；g) 传给支承辊的热量。

由于传热状况沿辊身长度方向不一致，与轧件接触的辊身中部获得的热量更多，所以轧辊中部的热膨胀要大于两端，即形成了热凸度。以直径表示的热凸度 ΔD_t 可以采用如下简化公式计算：

$$\Delta D_t = K_T\alpha(T_Z - T_B)D = K_T\alpha\Delta TD \qquad (4.1\text{-}51)$$

式中，T_Z、T_B 为辊身中部和边部的表面温度；D 为轧辊直径；K_T 为考虑轧辊中心与表面温度差的系数，一般 $K_T = 0.9$；α 为轧辊材料的线膨胀系数，对钢轧辊，$\alpha = 0.000\,013℃^{-1}$，对于铸铁辊，$\alpha = 0.000\,012℃^{-1}$。



工作辊的热膨胀可以通过调节轧辊冷却强度和冷却强度沿辊身的分布来控制。在冷轧，这种方法用来调整弯辊等手段不能控制的局部板形缺陷；对于热轧，可以采用提高或降低轧制节奏的方法控制热凸度。由于轧辊的热容量比较大，这些方法的效果不会马上显现，即时间滞后比较明显。

③ 轧辊的磨损。工作辊与轧件、工作辊与支承辊之间的相互摩擦都会使轧辊出现磨损，且磨损呈现不均匀性。由于影响轧辊磨损的因素太多，故尚难从理论上计算出轧辊的磨损量，只能靠大量实测来求得各种轧机的磨损规律，从而采取相应的补偿轧辊磨损的办法。

轧辊的磨损主要有三种类型：研磨、腐蚀和黏着。

a）热轧机的轧辊磨损。热轧的磨损属于热力学和机械疲劳共同作用的研磨磨损及腐蚀磨损，后者的作用要小一些。

由于在板宽范围内的磨损也是不均匀的，研究时，将其分为两部分：在宽度范围内的平均磨损和在板边区域的局部磨损。

图 4.1-46 为某热连轧机精轧机组第 2 到第 5 机架（用 F2～F5 表示）上工作辊使用前（用 G 表示）和使用后（用 W 表示）的辊形曲线。可以看到：在轧件宽度范围内，工作辊出现了显著的磨损，且磨损分布不均匀，最大磨损接近 0.7 mm。不同机架以及同一机架上下辊的磨损一般也不相同。

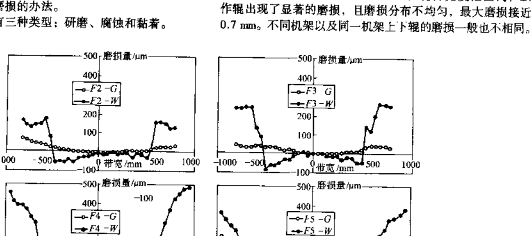


图 4.1-46 热连轧机精轧机架的工作辊磨损曲线

大池（Oike）等给出了在直径上的工作辊平均磨损量 C_m 的计算方法：

$$C_m = \alpha \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{P_i}{w_i l_i}\right)^a (r_i l_i)^b \frac{L_i}{\pi D}\delta_i(z) \qquad (4.1\text{-}52)$$

式中，$\delta_i(z)$ 为系数，$0 \leqslant z \leqslant \frac{w_i}{2}$ 时，$\delta_i(z)=1$；$z > \frac{w_i}{2}$ 时，$\delta_i(z)=0$；i 为轧制道次编号；n 为总的轧制道次；P_i 为轧制力；w_i 为带钢宽度；l_i 为轧辊与轧件接触弧长度；r_i 为压下量；L_i 为出口带钢的长度；D 为工作辊的直径；α、a、b 为取决于轧辊材质、带钢温度、轧辊咬入时的润滑条件和轧辊冷却等因素的经验系数。

在带钢边部区域轧辊的局部磨损 C_e 可按下式计算：

$$C_e = kC_m \qquad (4.1\text{-}53)$$

式中，k 为边部局部磨损增量系数。

b）冷轧机的轧辊磨损。在板带冷轧机上，研磨、粘接和腐蚀三种类型的磨损同时发生。与热轧相比，冷轧的磨损要小得多，一般在0.05 mm以下。它对板形的影响是比较小的。

c）磨损的控制。采用润滑或提高润滑效果，对控制轧辊的磨损十分有效；而利用工作辊的往复移动可以分散磨损，使轧辊磨损的不均匀性得到改善；对于热连轧机组，在工作辊的一个使用期内，按先宽后窄的方式安排轧件的轧制顺序，使工作辊磨损突变的区域保持在轧件的宽度以外；有些轧机上采用了在线磨辊装置，可以在轧制过程中对轧辊进行修磨，以保持良好的辊形。

3）工作辊的相对位置。辊形一定但上下辊的相对位置不同也会形成不同的辊缝。改变上下辊相对位置的方法主要有两种：一是上下辊相对轴向移动；二是上下辊相对交叉。

① 轧辊轴向移动变凸度。利用轧辊轴向移动改变辊缝的一个典型例子是德国西马克公司（SMS）开发并投入工业应用的 CVC（Continuously Variable Crown）技术。4 辊 CVC 轧机的上下工作辊被加工成互相颠倒的 S 形，如图 4.1-47 所示。当上下工作辊按相反的方向移动时，辊缝凸度就会连续变化，对比图 4.1-45，这相当于连续改变了工作辊的凸度。采用 CVC 技术的 2030 冷带轧机的辊缝凸度调节量可以达到 500 μm 以上。

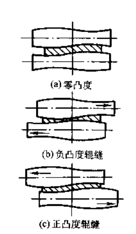


图 4.1-47 CVC 轧机的辊缝调节原理

CVC 工作辊的辊形曲线为 3 次函数，它形成的空载辊缝凸度与轧辊的轴向移动量间是线性关系、与辊缝宽度是平方关系。当采用其他形式的辊形曲线时，辊缝凸度与移动量之

间是非线性关系。

若在工作辊与支承辊间增加带有 CVC 辊形且可轴向移动的中间辊，这变成了 6 辊 CVC 轧机。这时的工作辊和支承辊可以是凸度辊或平辊，不需要移动。中间辊的轴向移动改变了辊间的压力分布，使得工作辊的弹性弯曲发生变化。

② 轧辊交叉变凸度。日本三菱公司开发了四辊 PC（Pair Crossed）轧机。它可以使上辊系（包括上工作辊和上支承辊）与下辊系（包括下工作辊和下支承辊）相对交叉一个角度，以改变辊缝凸度，见图 4.1-48。辊缝凸度与交叉角有关：

$$C = \frac{L^2}{2D}\tan^2\hat{\theta} \approx \frac{L^2}{2D}\hat{\theta}^2 \qquad (4.1\text{-}54)$$

式中，$\hat{\theta}$ 为交叉角度，rad；L 为辊缝长度或带钢宽度；D 为工作辊直径。

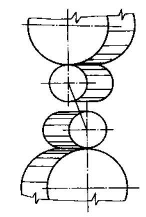


图 4.1-48 轧辊成对交叉的 PC 轧机

当工作辊为平辊时，形成负凸度的辊缝，即中间大、两边小的辊缝。

从式（4.1-54）看出，凸度与轧件的宽度（辊缝长度）的平方成正比。因此，PC 轧机适合轧制宽度大的轧件。假如工作辊的直径是 600 mm，交叉角为 1°。当板宽为 1 m 时，凸度为 0.25 mm；当板宽为 1.5 m 时，凸度为 0.75 mm。

轧辊的交叉角一般为 0°～1.5°。由于采用平辊，辊形加工简单。但是，轧辊的交叉也会带来较大的轴向力，需要采用专门的轴向固定装置。

（3）板形测量

板形测量装置安装在轧制线上，用于板形参数的实时监测与在线控制。与板形的含义一样，板形测量分为横截面形状测量与平坦度测量两大类。

1）横截面形状测量。用于横截面在线测量的都是非接触式测厚仪，目前主要有 X 射线测厚仪和 γ 射线测厚仪两种。前者多用于热轧，后者多用于冷轧。

最简单的横截面形状测量是测量横截面特定位置的厚度 h_c、h_d、h_w，见图 4.1-7，然后计算凸度 CR 和楔形 W：

$$CR = h_c - \frac{(h_d + h_w)}{2} \qquad (4.1\text{-}55)$$

$$W = h_d - h_w \qquad (4.1\text{-}56)$$

要得到以上结果，至少需要三台测厚仪：一台固定放置在轧机的中心线上，另两台放在两侧，可以沿宽度方向移动，以适应带钢宽度的变化和带钢偏离中心的情况。边部的两台测厚仪的移动方式有二种：一是采用带边跟踪的方式，以保证时刻对准带钢的边部；二是采用在带钢边部一定范围内周期往复扫描的方式。前者可连续测量，但跟踪的实现比较困难；后者的测量是不连续的，但容易实现，还可以用来测量板带的边部减薄。

为了得到横截面完整的形状，可以采用在整个宽度范围内移动扫描的测厚方式。这只需要一台测厚仪。不过测到的是与长度方向有一定角度的截面形状。该角度与轧件的运行速度和测厚仪的移动速度有关。为了消除带钢纵向厚度变化带来的测量误差，增设一台固定测厚仪，用两台测厚仪的差值表示横截面形状。

2）平坦度测量。平坦度缺陷的本质是轧件发生了不均匀的变形。其表现可以是出现翘曲和波浪，也可以是内应力分布不均匀，在施加了张力后，表现为张力的分布不均匀。两种表现可以同时存在，也可以以其中一种为主。

热轧时张力较小，带钢的刚性较低，容易出现可见的波浪，所以多采用直接测波形的方法，如测量波浪的高度或波浪的长度等。鉴于热轧高温、高尘的恶劣工作环境，一般采用非接触式。

冷轧时张力较大，不易出现可见浪形，故多采用测张力分布的方法。由于力的精确测量主要依靠接触测量方式，所以，冷轧的平坦度测量主要采用的是接触式。

① 非接触式。基于三角测距法平坦度仪是一种典型的非接触式测量仪。该方法依据位移成像原理如图 4.1-49 所示，由激光发射器和带光敏成像元件的接收器（摄像机）组成。激光器发射的激光投射到板带的表面形成光斑 B，当带钢的高度由 y_0 变为 y_1 时，光斑移动到 A，而在接收器的光敏成像器上，成像点由 B' 移动到 A'，像点的移动距离 h' 与带钢的移动距离 h 的关系为：

$$h' = \frac{k_1 h}{k_2 - k_3 h} \qquad (4.1\text{-}57)$$

式中，k_1，k_2，k_3 为系数。

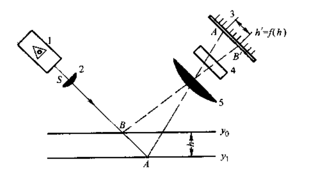


图 4.1-49 激光平坦度仪的三角测距法示意图
1—激光器；2—透镜；3—光敏元件（CCD）；4—滤色镜；5—摄像透镜

当带钢在辊道上运动时，利用以上方法，在时刻 t_1、t_2、…、t_n 连续测量带钢的高度 y_1、y_2、…、y_n，然后采用下式计算带钢纤维条长度如图 4.1-50 所示。

$$L = \sum_{i=0}^{n} \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + v_i^2(t_i - t_{i-1})^2} \qquad (4.1\text{-}58)$$

式中，v_i 为测量 y_i 时的带钢速度；n 为测量点数。

测量带钢宽度不同位置上的纤维条长度，根据它们的差别即可判定平坦度缺陷的类型和大小。

非接触方法的优点是仪器的安装和维护比较简单，硬件结构相对简单易于维护，其造价及备品、备件相对便宜，传感器为非传动件，安装方便，传感器不和板面接触，避免了划伤板面的可能；缺点是易受带钢振动或摆动的干扰，张力对测量结果的影响比较大，测量精度不高。

② 接触式。比较成熟的接触式平坦度仪是张力辊式，见图 4.1-51。在轧机的出口安装分段式测力辊，该辊沿轴向

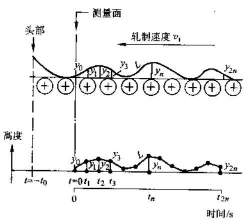


图 4.1-50　纤维条长度测量原理

分成若干个独立的测量环（段），每个环上都装有测力传感器。带钢在辊子上有一定的包角，在张力作用下对张力辊形成压力，其张力的分布状态就变成对张力辊的压力分布被这些测量环测出。

这种方法的优点是：信号检测直接，信号处理比较容易保真，测量精度高等；缺点是：造价高，备件昂贵，辊面磨损后必须重新修磨，否则会划伤板面，重磨后需进行技术要求很高的重新标定。典型的这类平坦度检测仪有：ABB公司的有滑环分段辊式、SIEMENS的无滑环分段辊式以及空气轴承式等。

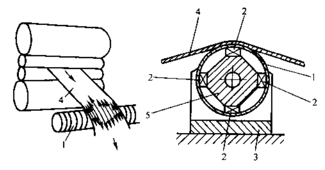


图 4.1-51　张力辊式平坦度仪

1—分段式测力辊；2—力传感器；3—垫板；4—带材；5—芯轴

5.3　温度和组织性能控制

（1）板带轧制中的温度控制

对于热轧和中厚板轧制，温度是影响钢板组织和性能的最主要的因素之一，要控制组织和性能就必须首先在生产过程中对温度进行有效的控制。在高速、连续和大型的热带轧机上，由于轧制温度不合理及头尾温度不均而造成的性能及厚度不合格已成为影响质量的重要问题。格对于中厚板，带钢热连轧机在实现整个生产流程线的温度自动控制最有成效。

带钢热连轧机的温度控制主要包括：

①精轧机组终轧温度的控制。带钢在轧机末架出口处的温度称终轧温度。对于超过百米的热轧带钢，不但要求带钢头部达到所要求的终轧温度，而且要求带钢全长的终轧温度均匀一致，这样才能保证在全长范围内力学性能及厚度的均匀。头部的终轧温度一般靠正确设定精轧出口速度来保证，而全长的温度均匀则靠正确控制机组加速度及机架间喷水量来实现。目前，终轧温度已能控制在±（10～15）℃左右，基本满足了要求。

② 卷取温度的控制。终轧温度一定时，这实际就是对带钢冷却速度的控制。随着带钢轧制速度的增高，轧后冷却能力也必须加强，尤其是轧制较厚带钢时，冷却速度往往达不到要求，因而如果不采用强化冷却的措施，冷却能力往往成为限制轧制速度提高的主要因素。其次是带钢的冷却速度不仅要高，而且要根据情况而变化，因为不仅是依板厚、钢种及板宽不同，其所需冷却速度不同，而且就是同一卷带钢，只要轧制速度一有变化，其冷却速度也要有所调整。因而在冷却系统设计中便要考虑对冷却速度进行灵活调整的需要。为此必须采用近代的层流冷却技术，并利用计算机控制技术来实现带钢冷却速度的自动调节。

③ 加热温度的控制。上述终轧温度和卷取温度的控制都希望板坯的出炉温度能够准确控制。因为板坯温度的高低及其均匀与否不仅直接影响终轧温度，而且关系到轧制过程能否顺畅。由于板坯温度是通过加热炉的加热温度来控制，而加热炉的热惯性太大，故其控制效果还有待进一步提高。

图 4.1-52 为某厂热连轧带钢生产线温度监测及控制设施简图，图中在出炉口、粗轧机组中间（如 R_1 之后）、粗轧 R_4 之后，精轧飞剪之前、精轧 F_7 之后及卷取机之前共5～6处设置有5～6个测温点，其中最重要的是粗轧 R_4 之后的测温点，因为此处测温条件较好，板坯厚度适中，经变形后表里温度均匀，表面干净，无水汽障碍，故测量结果比较准确，一般皆以它作为基础来对加热温度进行反馈控制和对终轧温度、卷取温度及层流冷却速度进行前馈控制。加热炉出炉口的测温点一般只用来监视出炉板坯，防止温度过低的板坯送去轧制。由于表面氧化皮太厚，此处测温不可能准确，所以不能用来实测出炉温度。精轧飞剪之前的测温点按理对于测定精轧入口温度是十分重要的，但也由于在中间辊道上产生的次生氧化皮而妨碍了测温的准确性，故精轧开轧温度一般常采用粗轧出口处的实测温度通过温降数学模型来计算确定，而此精轧入口前的温度计只是做校核计算之用。精轧机组后面的测温点为产品终轧温度的实测点。卷取机前的温度计为卷取温度的实测点。可见测温点只是安置在关键位置，且为数有限，而且其中有些点实测精度还不高，因此要确定轧件在任一位置的实际温度，便只能以某一处的实测温度为基础，通过数学模型进行计算。同时又可以根据实测温度来不断修正数学模型，及调整加热温度、轧制规程（速度）和冷却水量，以实现对终轧温度和卷取温度的自动控制。

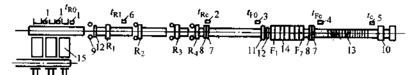


图 4.1-52　某热连轧带钢生产线温度测量及控制设施简图

1～6—温度点；7—测宽仪；8—测厚仪；9—大立辊；10—卷取机；11—飞剪；12—高压水除磷；13—层流冷却区；14—机架间喷水；15—加热炉

R_1～R_4—粗轧机组；F_1～F_7—精轧机组



1）终轧温度的控制。带坯从粗轧末架出口的温度（t_{Rc}）到精轧出口的温度（t_{Fc}），其间的总温度降包括了以下两部分：①在带坯从粗轧出口到精轧入口的中间辊道上主要通过辐射产生温度降；②带钢穿过精轧机组各机架，即从精轧入口到精轧出口的温度降。

为求精轧温度 t_{Fc}，一般倾向于采用直接统计的方法来确定终轧温度与各有关因素间的定量关系，但也可采用理论公式计算。

轧制过程中由于带坯头部和尾部进入轧机的时间不同，并且粗轧末架出口速度一般要大于精轧入口速度，故尾部轧制温度将比头部低，为此而采用"升速轧制"来缩短尾部在轧制前的停留时间，减少其热量损失，以补偿其温度降，使其头尾温度均匀一致。由于速度升高不仅减少了热损失，而且增加了塑性变形热，若升速过快反会使带钢温度过高，也不合于要求。因此，加速度的大小需根据试验确定。一般若为保持终轧温度恒定，只需大约 0.05 ~ 0.2 m/s² 的加速度即已足够。而轧机实际的加速能力可达 1 ~ 2 m/s²。因此，近年来发展了新的控制方案，即是把终轧温度的控制变量由速度改成为机架间喷水量。为了提高产量可采用大的加速度，而通过改变机架间喷水量来控制带钢全长终轧温度的均匀性。

2）卷取温度（冷却速度）的控制。由精轧机组轧出的带钢在进入卷取机之前，由于组织和性能等方面的要求，必须使其迅速冷却到所需要的温度。现代热连轧机出口速度达到每秒 20 ~ 30 m，而由精轧机到卷取机之间的输出辊道长度一般只有百多米。为了在 5 ~ 15 s 内将带钢由 850℃迅速冷至 600℃左右，必须在输出辊道的 70 ~ 80 m 长度上设置喷水装置对带钢进行强制冷却。近代带钢热连轧机输出辊道冷却系统一般采用层流冷却方式，即采用循环使用的低压大水量的冷却系统，因为有人根据试验，认为冷却效果在通常情况下与水压或送水方式无关，而只与水量的大小有关，因而冷却水量需与轧制速度及带钢厚度成线性增加。采用高压喷水的冷却效果由于水滴的喷溅反射受到影响，反不如低压大水量的冷却效果好。层流冷却几乎使钢板泡在水中，并且通过辊道两侧的侧喷嘴不断地将钢板表面的水汽层吹开，使新的水流不断接触钢板，因而其冷却效率通常要比高压喷水方式提高约 30% ~ 40%。如图 4.1-53 所示，沿层流冷却区域装有多组多段集管（喷头），上下集管同时喷水。

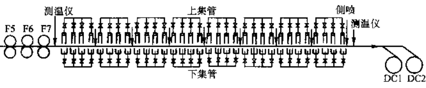


图 4.1-53 热带连轧机层流冷却装置示意图

层流冷却系统根据带钢钢种、规格、温度、速度等工艺参数的变化，利用数学模型预算出所需冷却段数，控制冷却集管的开闭数量，进行带钢冷却温度的设定控制。为了克服喷头阀门的滞后作用，控制信号应提前发出，才能保证带钢头部的卷取温度。当带钢头部到达卷取机前的测温仪，测得实际的卷取温度后，根据实测与目标之间的差值，计算需要增加或减少的喷头数量，对卷取温度进行反馈精调控制（图 4.1-54）。

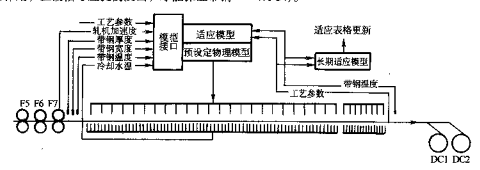


图 4.1-54 层流冷却控制原理图

层流冷却装置通常分为主冷却段和精调段。按照各种产品冷却要求之不同，典型的冷却方式有：前段冷却、后段冷却、均匀冷却和两段冷却（图 4.1-55）。下面仅说明前两种。

前段冷却：带钢出精轧机后即从前段喷水冷却，以后再加温度补偿量及反馈控制量，这种方法主要适用于钢带厚度稍大（大于 1.6 mm）的普通钢的冷却和有急冷必要的高级电工钢等的冷却。

后段冷却：只利用后段的层流冷却设施。这种方法适用

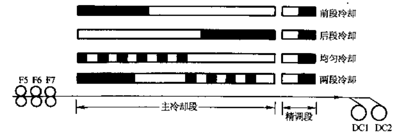


图 4.1-55 典型的层流冷却方式

于厚度很薄（例如 < 1.6 mm）的普通钢薄板和低级电工钢的冷却，它主要是考虑使带钢在输出辊道上容易通过及薄板用不着太强的冷却。

对于厚度更大（例如约 8 mm 以上）的板及硬质钢材，为了使其头部和尾部容易卷取，应采用带钢头、尾部不冷却的方法。即通过跟踪头、尾部在输出辊道上的位置，在头、



尾部约10 m的长度上不喷水，但带钢中间部分仍采用一般的冷却方法进行控制。

生产过程中必须对带钢尾部进行跟踪。因为前一块带钢的尾部和后一块带钢的头部可同时在输出辊道上冷却，由于钢板数据不一样，冷却方法也不一样，计算机所用的数学模型就可能不一样，因此必须对尾部进行跟踪，在前卷带钢尾部离开以后，冷却模型立即改变到后一块钢所需要的设定值。这样才能保证生产的连续顺利进行。

(2) 板带组织性能的控制

1) 厚板组织性能的控制。钢板要有良好的组织性能，先决条件是需有良好的原料。钢的化学成分及杂质含量直接影响到成品钢板的组织性能。因而铸锭和铸坯的组织状态和成分分布对板带性能有极大的影响。通常是钢锭上半部的正偏析区强度较高而塑性较差，而下半部负偏析区则与此相反，这样在相应于这些部位轧制出的板带也会产生组织性能的差异。沿钢锭横断而偏析不均匀，同样会反映到钢板性能上，比如相应于钢锭边部细晶粒带的板带边部强度和塑性都较好，而相应于中心偏析杂质富集区的板带中部往往塑性较差。钢中一般常见元素按偏析倾向大小的次序是：硫、磷、碳、硅等。硫最易偏析，且因其在固态钢中的溶解度很低，故钢中的硫几乎都以硫化物夹杂的形式存在着，在夹杂物总量中绝大多数为硫化物，甚至达90%以上。硫化物存在的主要形式是MnS，由于其塑性较好，在钢板、尤其是成卷带钢的轧制过程中，MnS沿着单一的轧制方向延伸，拉长成条带状存在于钢板中，明显地降低钢板的横向塑性和韧性，造成板带组织性能的方向性。为了改善钢板、尤其是热轧板卷的这种方向性，减少横向与纵向性能的差异，近来往往采用在钢中加人锆、钛、钙或其他稀土元素的方法，来控制硫化物的种类和形态，使之成为难变形的脆性夹杂，轧碎后成颗粒状分布。此外，最近还有往钢水包中喷硅钙粉末，以使MnS成为细小颗粒的新技术，这样自然就大大减少其有害的作用。除此以外，铸锭或铸坯的初生组织状态对板带的最终性能也有重要影响。初生宏观组织不良，包括钢质的严重沾污、内部疏松及皮下气泡等；而初生微观组织不良则包括枝状组织、魏氏组织等。虽然在经过轧制或热处理后，钢的组织结构已经发生强烈的变化，但初生组织仍往往不同程度地要影响到成品钢板的质量。例如，某厂在初期试生产A_3中板时，仅仅由于气囊及断面分层所造成的废品率就达14%，直到后来在更好地控制了炼钢和铸锭操作以后，才使分层废品降到0.6%。由此可见，钢质的问题是何等重要。

除了要充分注意影响钢板最终力学性能的材质因素之外，还必须严格控制钢板轧制生产过程的工艺因素，才能通过轧制加工获得性能优异的板带。轧钢生产过程的工艺因素包括原料的加热制度、轧制压下规程、尤其是终轧温度、冷却速度及卷取或堆垛温度等。在钢质既定的条件下，如何通过对轧钢工艺因素的控制来获得更高性能的板带，是板带控制轧制技术的发展动力。

关于物理性能（如磁性）及工艺性能（如冲压性）的控制，以取向硅钢片为代表，从高温加热开始，直至高温终轧、快速冷却和低温卷取，其所有工艺控制措施的目的是旨在利用微量有利夹杂（如AlN、MnS等）的固溶和析出，以促使结晶织构的形成与发展，来谋求获得某种高取向度、高物理性能的钢板。虽然实质上这也是一种控制轧制方法，但人们通常所称的控制轧制，却多是对控制钢材的综合力学性能、主要是强韧性而言。与上述物理性能不同，控制综合力学性能的所有工艺措施，则主要是旨在对奥氏体晶粒度、对经相变重结晶后碳化物的存在形式及其分布特征，以及对最终铁素体晶粒度的控制，以谋求获得均匀的细晶粒度、细组织结构的高力学性能的钢板。

对板带轧制而言，近代控制轧制技术应用和发展最迅速的首推中厚板轧制及热连轧带钢。在实际生产中，无论是中厚板或是热连轧板带，对奥氏体晶粒度的控制都必须从钢锭或钢坯加热时就加以注意。不仅要防止产生过烧、过热及严重脱碳现象，而且要避免晶粒过于粗大。有时为了使奥氏体原始晶粒度细小一些，而有意地将加热温度降低，或者往钢中添加一些有抑制再结晶及阻碍晶粒长大效果的元素，加Nb、Ti等。因为奥氏体原始晶粒的大小会直接影响到再结晶后的奥氏体晶粒的大小，加热温度主要就是通过影响原始奥氏体晶粒度和碳、氮化物的溶解度，亦即其后的沉淀硬化效果来起作用。降低加热温度可使原始奥氏体晶粒细化及沉淀硬化作用减小，可使轧制温度也相应得到降低，因而能使脆性转化温度降低，也就是使韧性得到提高。故生产中加热温度及保温的时间应当因钢种而不同，并且还必须随时按照生产情况的变化加以调整。

热轧工艺因素之中，对钢的力学性能影响最大的是轧制温度。随着轧制温度下降，由于铁素体晶粒的细化而使强度上升，脆性转化温度下降。

实际上在控制轧制中，各种工艺因素是互相关联的，对于同一目的，比如要使脆性转化温度下降，可以有各种手段。作为控制轧制的主要方法可以有：①降低加热温度，使原始奥氏体晶粒细化。②控制适宜的终轧温度及采取强化压下等措施，使奥氏体再结晶晶粒及以后的铁素体晶粒充分细化。此时若采用轧制中途停顿或多道小压下的方法来控制终轧温度，应防止奥氏体晶粒粗化，在以后会形成粗细不均的混合晶粒组织。③加入合金元素如铌、钛等，以抑制再结晶，使晶粒细化。④控制冷却速度，以增多和细化铁素体晶粒：当终轧温度高于Ar_3时，轧后缓慢冷却会产生粗大的铁素体晶粒，使强度降低，脆性转化温度提高；但对含锰量较高（比如≥1.5%Mn）的钢，在950℃Ar_3以上终轧后，快速冷却易出现贝氏体而使脆性转化温度升高。因此必须按钢板的品种和钢种实际情况控制适当的冷却速度。⑤如前所述，控制纵、横变形比值，以减少组织性能的方向性等。实际生产中根据产品技术要求及钢种特性，可以采用各种方法来控制钢板所需要的组织和性能。由于低温轧制时，轧制压力和力矩都大为增加，故在工厂里采用控制轧制时，必须考虑到轧机最大允许压力和力矩的限制，考虑到生产能力的发挥及操作的安全性，根据工厂的实际条件选择最合适的控制方法。

2) 带钢组织性能的控制。热连轧带钢的生产情况与厚板轧制有所不同。厚板轧机上可以灵活控制轧制温度和轧制压下规程，但不易控制轧后冷却；与此相反，在热带连轧机上一般不易控制精轧温度及道次，却可以较方便地控制轧后冷却速度和卷取温度，而卷取后冷却缓慢，即相当于缓冷回复过程。因此对加热温度、终轧温度、冷却速度和卷取温度的综合控制不仅对热轧带钢的力学性能，而且对其后的冷轧产品的性能都产生极重要的影响。

为了得到细小而均匀的铁素体晶粒，希望终轧温度稍高于Ar_3，因为若低于此温度，铁素体将受到加工变形，经过缓冷回复及再结晶退火而粗化，结果会得到不均匀的混合晶粒组织，而使强韧性变坏。此外，终轧温度和卷取温度过低，还会产生残余应力，使钢板变硬，不仅使卷取和冷轧加工困难，而且影响厚度和性能都难达到要求。但终轧和卷取温度过高，又会使晶粒粗大并呈带状，容易产生不良的方向性并使力学性能变坏，同时还影响冷轧钢板的晶粒度，使冷轧塑性变坏及深冲性能下降。卷取温度过高还容易产生坚实的氧化铁皮，使酸洗困难。实验表明，在轧制低碳钢板时，终轧温度应在Ar_3以上，卷取温度应在Ar_1以下，这样可以得到均匀而等轴的细晶粒组织和弥散度较高的碳化物相，这

相当于图 4.1-56 的 1 区。若卷取温度较高，将生成均匀的粗晶粒组织，同时碳化物会产生相当程度的积聚，对钢板性能不利；这相当于图 4.1-56 中的 4 区。图 4.1-56 中 2 区为 Ar_3 以下终轧及低温卷取时，由于铁素体经受了加工变形，使表面层出现铁素体粗晶，因而形成不均匀的晶粒组织。若在此条件下进行高温卷取，便会生成很不均匀的粗晶组织，表层晶粒极为粗大（图中的 5 区）。终轧温度再低，将出现被延伸的铁素体晶粒，在低温卷取后仍保留于钢中（图中 3 区），或者在高温卷取时，由于自身回火产生再结晶而形成粗晶粗织（图中 6 区）。实践表明，对深冲钢极终轧温度要求在 900℃左右，卷取温度不高于 600 ~ 630℃，这样可获得最合适的晶粒度。对于电工硅钢板，高的加热温度和终轧温度，加上轧后快冷和低温卷取有利于控制夹杂的尺寸、形态及分布特征，才能使成品有高的取向度和好的导磁性。对于低合

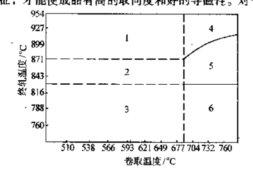


图 4.1-56 终轧温度与卷取温度的不同组合对轧件晶粒组织的影响
1—均匀细晶粒、碳化物很细；2—表层粗的不均匀晶粒；
3—出现由冷加工引起的拉长晶粒；4—均匀粗晶；
5—不均匀的粗晶；6—晶粒很粗

金结构钢（16Mn）钢板，随卷取温度降低，屈服强度迅速提高，而对冲击韧性和脆性转变温度却是 600℃左右卷取最为有利。这是因随卷取温度降低，虽然能使晶粒细化及韧性改善，但也使 AlN 析出量减少，亦即使固溶于铁素体中的氮含量增加，却又使韧性变坏。综合这两方面的影响，可以得出 600℃是有利的卷取温度。通常，卷取温度在 500 ~ 700℃之间，视产品技术要求和设备的能力而定。

带钢热连轧以后的冷却速度对于钢板的组织和性能有着极重要的影响。对于不同的钢种，不同的板厚，所需的冷却速度也不同。有人通过试验得出：当其他条件如钢种、板厚、终轧及卷取温度和轧制规程等都相同，只是冷却速度不同时，也引起性能的较大差别：其硬度波动达 8%、屈服强度波动达 4%，深冲值波动达 10%、延伸率波动达 7%。由此可见，冷却速度对带钢组织和性能影响之大，与终轧温度、卷取温度相似，冷却速度对性能的影响实质上也是通过对晶粒度和夹杂物（碳、氮、硫化物等）存在形式及分布特征的影响来起作用的。低碳低合金钢冷却第一阶段先从奥氏体析出铁素体，然后形成珠光体。冷却速度快，过冷度增大，则铁素体晶粒多而细，珠光体构造也越细越分散；若冷却速度过快，甚至来不及完成转变，而形成不稳定的贝氏体组织；反之若冷却速度太慢，则珠光体构速变粗，晶粒度也粗大。各种钢的冷却速度应根据其技术要求和奥氏体连续冷却转变曲线来决定。实际上，在设备既定的情况下，一定的终轧和卷取温度便决定了冷却速度，故对卷取温度的控制也就是对冷却速度的控制，反之亦然。

编写：张　杰（北京科技大学）
曹建国（北京科技大学）

第2章　型材轧制成形

1　型钢的品种及其生产工艺过程

1.1　型钢的品种和用途

以轧制方法生产的型材分黑色金属型材和有色金属型材二类，但前者的产量和应用远远大于后者。由于轧制成形方法基本相似，这里主要针对黑色金属型材的轧制。黑色金属型材一般称为型钢。

型钢在机械制造、工业和民用建筑、铁路、汽车、造船、矿山、轻工业等领域中都有广泛的应用。我国型钢产量占钢材总产量的比例较高，约为50%左右（2001年为52.08%，见表4.2-1），而发达国家则为30%左右。随着我国对钢材结构的调整，板材和管材的比例将不断增加，而型钢所占的比例亦将相应减少，使我国钢材产品的比例结构更趋于合理。

表4.2-1　2001年我国型钢产量一览表

名　称	型钢类型			钢材总产量/万吨
	大中型钢	小型型钢	线材	
产量/万吨	879.78	4 359	2 962	15 745
占钢材总产量比例数/%	5.59	27.68	18.81	
型钢总比例数/%	52.08			

型钢的品种规格是指钢材的断面形状和尺寸的总称，目前已达万种以上。型钢品种规格多是型钢生产的一个主要特点，除少数专用轧机生产专门产品外，绝大部分型钢轧机都进行多规格多品种的生产。按生产方法分，可分为热轧型钢、冷轧型钢、冷拔型钢、冷弯型钢、焊接型钢和用特殊方法生产的型钢（如火车车轮、轮箍、钢球、齿轮、变断面阶梯轴）等。其中，热轧是目前生产型钢的主要方法，这是因为热轧型钢生产具有生产规模大、效率高、能耗少和成本低等优点。

（1）热轧型钢

1）热轧型钢的类型。热轧型钢按其使用范围可大致分为常用型钢（如方钢、圆钢、扁钢、工字钢、槽钢、角钢等）和专用型钢（如钢轨、钢桩、窗框钢等）两大类。如按使用部门则可分为铁路用型钢、汽车用型钢、结构与建筑用型钢、造船用型钢、矿山用型钢、机械制造用型钢等。如按型钢的断面形状可分为简单断面型钢、复杂断面型钢和周期断面型钢三大类。

简单断面型钢是指钢材断面对称，且无明显凹凸部分，外形比较简单的型钢，如方钢、圆钢、扁钢、六角钢等（见表4.2-2）。复杂断面型钢，也可称为异形断面型钢。其断面由两个或两个以上的简单几何形状组成，具有明显凹凸分肢部分或具有长面薄的翼缘（见表4.2-3）。根据断面对称轴的情况不同，复杂断面型钢可分为：具有一个对称轴的型钢（如槽钢、T字钢的断面具有水平或垂直方向的对称轴）；具有两个对称轴的型钢（如工字钢、H型钢的断面具有水平和垂直方向的两个对称轴）；没有对称轴的型钢（如球扁钢、窗框钢的断面在垂直和水平方向都没有对称轴）。周期断面型钢的断面尺寸和形状沿钢材纵轴方向呈周期性变化，如带螺纹钢筋（也称为螺纹钢）、变断面轴等。表4.2-2和表4.2-3分别列出了部分简单断面型钢和异形断面型钢的断面形状、表示方法、规格、交货状态和用途。表4.2-4则列出了部分周期断面型钢的形状、轧制方法和用途。

表4.2-2　部分简单断面型钢

名称		断面形状	表示方法	规　格	交货状态	用　途
圆钢			直径/mm	10～40 ＞40 50～350	条（卷） 条 条	钢筋、螺栓、零件 冲锻零件、无缝管坯、轴
线材			直径/mm	4.6～12.7	卷	钢筋、二次加工钢丝
方钢			边长/mm	4～250	条（卷）	零件
扁钢			厚/mm×宽/mm	3～60×10～240	条（卷）	焊管坯、箍铁
弹簧扁钢			厚/mm×宽/mm	7～13×63～120	条	车辆板簧
三角钢			边长/mm	9～30	条	零件、锉刀
弓形钢			宽/mm×厚/mm	15～20×5～12	条	
椭圆钢			宽/mm×高/mm	10～26×4～10	条（卷）	
六角钢			内接圆直径/mm	7～80	条	螺母、风铲、工具
角钢	等边		以边宽的1/10表示，如边宽20 mm，则表示为No.2	No.2～ No.25	条	金属结构、桥梁
	不等边		以长边宽度/短边宽度的1/10表示，如长边宽度/短边宽度25/16 mm，则表示为No.2.5/1.6	No.2.5/1.6～No.25/16.5	条	



表 4.2-3 部分异形断面型钢

名称	断面形状	表示方法	规格	用途
工字钢		以高度的 1/10 表示，如高度 200 mm，则表示为 No.20	No.8～No.63	
H 型钢			No.8～No.63	
槽钢			No.5～No.40	
钢轨		以每 m 单位质量表示，如 50 kg/m	5～24 kg/m 38～75 kg/m 80～120 kg/m	轻轨，矿山用 重轨，铁路用 起重机轨，起重机用
T 字钢		以腿宽表示，如腿宽 200 mm，则表示为 T_{200}	T_{20}～T_{400}	结构件，铁路车辆
Z 字钢		以高度表示，如高度 310 mm，则表示为 Z_{310}	Z_{60}～Z_{310}	结构件，铁路车辆
窗框钢			品种规格 20 余种	钢窗
钢桩			槽型、Z 型、板型、U 型	矿山、码头、海港、井下工程
球扁钢		宽×厚	50×4～270×14 mm	造船
履带钢				拖拉机、电铲等链板
鱼尾钢		以对应的钢轨表示		钢轨接头
轮辋钢		以对应的汽车表示		汽车轮辋
其他小异型钢				纺织、轻工、化工、船舶等

表 4.2-4 部分周期断面型钢

名称	形状	轧法	用途
螺纹钢		二辊纵轧	建筑、地基、混凝土结构
犁铧钢		二辊纵轧	犁铧
轴承座圈		二辊斜轧	轴承外座圈
变断面轴		二、三辊楔横轧	各种轴类
犁刀型钢		二辊纵轧	犁刀坯

2）线材与棒材　表 4.2-2 中的线材是指钢材的长度与断面之比极大，一般是成盘卷交货的圆形钢材。应该指出，随着钢材成卷技术的发展，按盘卷状交货的圆钢直径已超过 12.7 mm，可达 40 mm，此外，除圆形钢材可以按盘卷状交货外，方钢、椭圆钢、扁钢等某些规格的产品也可按盘卷状交货。因此，从广义上来说，线材的断面直径（或边长、厚

度）为 5 ~ 40 mm，线材的形状为圆形，方形或某些断面形状较为简单而按盘卷状交货的钢材。但是，线材最主要的断面形状还是圆形，我国线材车间产品的断面直径一般是 5 ~ 10 mm，而国外通常认为线材的断面直径为 5 ~ 40 mm。

按直条状交货的某些简单断面型钢又称为棒材。棒材的品种按断面形状分为圆形、方形和六角形等。国外通常认为棒材的断面直径为 9 ~ 300 mm，而我国一般认为棒材车间产品的断面直径为 10 ~ 50 mm。

对于周期断面型钢中的带肋钢筋（螺纹钢）如呈盘条状交货时可认为是线材，而按直条状交货则为棒材。

3) H 型钢。表 4.2-3 中的 H 型钢，其断面形状与大写拉丁字母 H 相似，是一种目前普遍重视和发展的经济断面型钢。经济断面型钢是指断面形状类似于普通型钢，但断面上各部分金属分布更加合理，使之质量轻而截面模数大，既省金属又有较大承载能力，使用时的经济效益高于普通型钢。例如，H 型钢断面形状类似工字钢（图 4.2-1），但工字钢上下边部（亦称为翼缘）内侧是一个具有一定斜度的斜面，并由圆弧与其相关部分连接，而 H 型钢边部内侧是与外侧平行或接近平行的平面，边的端部呈直角，故 H 型钢又称为平行边工字钢。与腰部同样高度的工字钢相比，H 型钢腰部厚度小而边部宽度大，因此，H 型钢又称为宽缘工字钢。综合上述特点，H 型钢亦可称为平行宽缘工字钢，其截面模数，惯性矩及相应的强度和刚度均明显优于同样单重的工字钢。工程中采用 H 型钢能节约金属 10% ~ 40%，且便于拼装组合成各种构件，从而可节约焊接或铆接工作量达到 25%左右，具较高的经济效益。

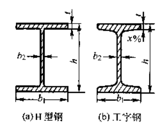


图 4.2-1 H 型钢与工字钢的比较

(2) 冷弯型钢

冷弯型钢也是一种经济断面型钢，它以板带材为原料，经冷弯曲加工成各种断面形状的产品。与热轧型钢相比，冷弯型钢具有以下优点：

① 断面简单的冷弯型钢（如槽钢、角钢），由于其整个断面厚度一样，用它来制造构件，可简化装配工序，减轻安装劳动强度；

② 能生产断面形状复杂而用热轧方法不能生产的各种特薄、特宽的薄壁型钢，坯料可薄到 0.1 mm，轧件断面展开宽度可达 2 000 mm；

③ 可通过改变型钢断面形状来提高型钢强度，而热轧型钢一般是以增加断面面积来提高强度，故冷弯型钢的断面经济合理，节省金属。在同样质量和断面面积下，冷弯型钢的惯性矩和截面模数高于热轧型钢。在同样负荷下，可减轻构件重量，在建筑工程中采用冷弯型钢比用热轧型钢节约钢材 38% ~ 50%；

④ 产品精度和表面粗糙度要比热轧型钢好得多。

由于上述优点，近十几年来，冷弯型钢得到了一定的发展，其品种和规格都在不断增加和扩大，产品厚度由 0.1 ~ 20 mm，断面展开宽度为 20 ~ 2 000 mm，断面形状可分为对称和不对称两大类，按开口程度不同又可分为开放型、半封闭型和封闭型三大类（图 4.2-2）。冷弯型钢品种很多，广泛用于汽车、造船、家具、农具等制造部门。

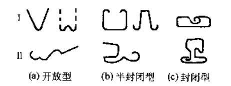


图 4.2-2 冷弯型钢示例

Ⅰ—对称；Ⅱ—不对称

1.2 热轧型钢轧制方法和特点

(1) 热轧型钢的工艺过程

如前所述，热轧是目前生产型钢的主要方法。将坯料（连铸坯、钢坯或钢锭）轧成各种型钢，需要经过一系列的工序，这些工序的组合和顺序叫做工艺过程（或称为工艺流程）。由于型钢品种规格多，钢种和用途不同，其工艺过程也各不相同。但是，一般来说，热轧型钢生产工艺过程可由以下几个基本工序组成。

① 坯料准备。这一工序包括按坯料冶炼炉号堆放入库、清理表面缺陷和去除氧化铁皮等。

② 坯料加热。这是热轧生产中的一个重要工序，它将坯料加热到所需要求的温度。

③ 轧制成材。这是型钢生产工艺过程的核心工序。加热后的坯料通过轧钢机轧制成具有一定形状和尺寸精度的钢材（型钢），并使其内部组织、性能和表面质量符合规定的要求。

④ 钢材精整。这是型钢生产工艺过程的最后一个工序，也是一个比较复杂的工序。精整工序通常包括钢材的切断或卷取、轧后冷却和矫直、成品热处理、成品表面清理和标志涂色，以及包装等具体工序。钢材精整工序对产品质量起着最终的保证作用。

(2) 型钢轧机的标称

轧制成材工序的主要设备是轧钢机（简称轧机）。型钢轧机的主要性能参数是未车削孔槽时的轧辊名义直径 D（见图 2.4-3），因为轧辊名义直径的大小与其能轧制钢材的最大断面尺寸有关。因此型钢轧机的标称最常用的是以其轧辊名义直径来标称的。型钢轧机名义直径的大小通常是与传动轧辊的齿轮箱中心距相同。如果在一个轧辊车间中装有若干列（图 4.2-4a）或装有若干架（图 4.2-4b）轧机时，则以最后一架精轧机的轧辊名义直径作为该车间轧机的标称。

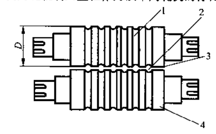


图 4.2-3 型钢轧机轧辊示意图

1—孔型槽；2—孔型；3—辊缝；4—轧辊

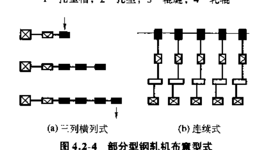


图 4.2-4 部分型钢轧机布置型式

应该指出，性能参数相同的型钢轧机，采用不同布置型式时，其产品、产量和轧制工艺就不同。因此，上述标称方法还不能反映各种型钢车间的技术特征，故还应考虑轧机的布置型式及轧机的用途。例如，“300 mm 连续式小型轧机”，其中，“300 mm”表示最后一架精轧机轧辊名义直径为300 mm，“连续式”是指轧机的布置型式，“小型”则表示轧机的用途是生产小型型钢。

此外，有些型钢轧机的标称往往考虑轧机较为特殊的结构型式或轧制特点。例如：“Y 型轧机”（参见图 4.2-7）、“高速无扭连续式线材轧机”等。

由于轧辊名义直径（简称为轧辊直径）与轧机能轧制钢材的最大断面有关，故按轧辊直径可将型钢轧机分为轨梁轧机、大型轧机、中型轧机、小型轧机和线材轧机。表 4.2-5 列出了各类型钢轧机的主要技术特征。其中，轧制速度是指轧件在最后一架精轧机的轧出速度。轧制速度越高，轧机产量就越高。所以，提高轧机轧制速度是提高其生产率的一个主要途径。

（3）型钢轧制方法

表 4.2-5　各类型钢轧机主要特征

轧机类型	轧辊尺寸/mm		最大轧制速度/m·s⁻¹	产品范围
	直径	长度		
轧梁轧机	750 ~ 900	1 200 ~ 2 300	5 ~ 7	38 kg/m 以上重轨；No.24 以上的工字钢、槽钢
大型轧机	500 ~ 750 (650 ~ 850)	800 ~ 1 900	2.5 ~ 7	18 ~ 75 kg/m 钢轨；No.22 ~ No.63 工字钢，槽钢，ϕ80 ~ ϕ350 mm 圆钢
中型轧机	350 ~ 300 (350 ~ 650)	600 ~ 1200	2.5 ~ 15	直径或边长 32 ~ 102 mm 圆钢、方钢；8 ~ 30 kg/m 钢轨；No.5 ~ No.16 工字钢，槽钢
小型轧机	250 ~ 350	500 ~ 800	4.5 ~ 20	直径或边长 9 ~ 65 mm（连轧达 75 mm）的圆钢，方钢；No.5 ~ No.8 工字钢、槽钢，No.2 ~ No.8 角钢
线材轧机	250 ~ 350	500 ~ 800	10 ~ 50	直径 5 ~ 9 mm 线材
高速线材轧机	150 ~ 250 （辊环直径）	62 ~ 100 （辊环宽度）	50 ~ 140	直径 5 ~ 13 mm 线材，盘卷达 16 ~ 50 mm

坯料是通过由轧机轧辊组成的不同孔型系统轧制成各种断面形状和尺寸的型钢。热轧型钢的轧制方法可以分为普通轧制法和多辊轧制法两大类。

1）普通轧制法。该轧制法一般是在二辊或三辊轧机（图 4.2-5）上进行的。这类轧机两个或三个轧辊轴心线是平行配置。在上、下（或上、中和中、下）轧辊上车削成一个或多个具有一定形状和尺寸的轧槽，形成一定的孔型。孔型有开口孔型和闭口孔型之分（图 4.2-6）。轧辊的辊缝 S 在孔型轮廓之内的孔型，称为开口孔型。轧辊的辊缝 S 在孔型轮廓以外的孔型，称为闭口孔型。开口孔型能充分确保轧件垂直方向的压缩变形，而闭口孔型的孔型侧壁还能对轧件在水平方向进行较大的压缩变形。普通轧制法可生产简单断面、异形断面和纵轧周期断面的型钢。在轧制异形断面的某些产品时，往往就采用闭口孔型。由于闭口孔型轧辊轧槽各部分存在明显的辊径差，无法轧制翼缘内外侧平行的经济断面型钢。而且，轧辊直径还限制了所轧型钢的凸缘高度，辊身长度也限制着所轧型钢的宽度，故轧制 No.60 以上的大型工字钢等钢材较为困难。闭口孔型辊径也会引起孔型内各部分金属的相对附加流动，使轧制能耗增加，孔型磨损加快，钢材内部产生较大的残余应力，影响其质量。但是，这种轧制方法设备比较简单，仍是大多数型钢生产的主要轧制方法。

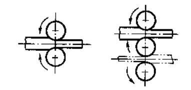


图 4.2-5　二辊和三辊轧机示意图

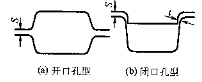


图 4.2-6　开口孔型与闭口孔型

2）多辊轧制法。多辊轧制法的特点是：孔型是由三个以上轧辊的轧槽所形成的。例如：图 4.2-7 为 Y 型三辊轧制法。其孔型由三个轴心线互成 120°角的盘状轧辊组成，好似英文字母的“Y”，故这种轧机称为 Y 型轧机。由于是三个轧辊轧槽的孔型能对轧件实行三向压缩，有利金属延伸变形和使变形均匀。图 4.2-8 是轧制 H 型钢的万能轧制法。所采用的轧机除有两个主动的水平辊外，在其两侧还设置两个被动（或主动）的立辊，由这四个轧辊形成一个孔型。这种轧机称为万能轧机，是轧制 H 型钢最适宜的方法。它与普通轧制法相比有以下优点：

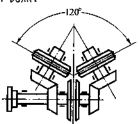


图 4.2-7　Y 型三辊轧制法

① 可以轧制翼缘内侧与外侧平行或接近平行的产品，而采用闭口孔型轧制时是无法轧制的。

② 由于轧辊组成的孔型各部分是对称的，轧制时可使轧件的翼缘部分宽展，轧件表面质量及性能较好。

③ 轧辊磨损小。

④ 易于自动化。

应该指出，万能轧制法不仅限于轧制 H 型钢，也可进行槽钢，钢轨等产品的轧制。当钢轨采用万能轧制法时，与普通轧制法相比，其产量可提高 1.8 倍，作业率提高 10%，



轧辊消耗降低 20%。

由上可见，多辊轧制法具有较大的优点，有较好的发展前景。图 4.2-9 为采用多辊轧制法轧制角钢、槽钢和 T 字钢的示意图。

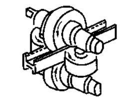


图 4.2-8　轧制 H 型钢的万能轧制法

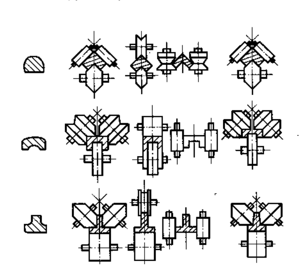


图 4.2-9　多辊轧制法轧制角钢、槽钢和 T 字钢

(4) 型钢轧制特点

各种型钢轧制有一个共同的基本特点，即都是在孔型中轧制。坯料的形状有方坯、矩形坯和异形坯，从坯料到型钢成品，要经过几个道次，多则达二十几道次的孔型轧制。由于各道次的轧件与孔型断面形状有明显区别，在孔型轧制中，与板材平辊轧制时具有较大的不同之处。现以普通轧制法的二辊孔型为例，说明轧件在孔型轧制时的金属变形特点。

轧件在孔型中轧制时，其主要特点是轧件产生严重的不均匀变形。如图 4.2-10 所示，轧件在孔型中轧制时，沿轧件宽度方向压下不均匀，即在轧件同一断面上各点变形不均匀，导致孔型内金属的变形过程十分复杂。此外，孔型与轧件往往也不是同时接触的。如图 4.2-11 所示，椭圆形轧件进入菱形孔型中轧制时，轧件尖角先与孔型接触，如断面Ⅳ-Ⅳ，然后再与椭圆形轧件其他点依次接触。(断面Ⅲ-Ⅲ~0-0)。由于轧件与孔型接触点不同，轧件压缩部分不同，对金属纵向和横向变形产生一定的影响。而且，孔型各部分存在明显的辊径差，使轧辊各点的线速度不同，但是轧件是一个整体，出口速度是相同的，这也会造成轧件各部分相互拉扯而产生不均匀变形。

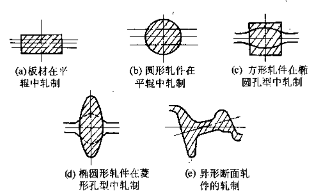


图 4.2-10　轧件在几种孔型中的轧制状况

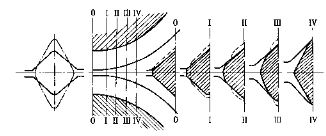


图 4.2-11　椭圆形轧件在菱形孔型中轧制时，轧件与孔型接触状况

在轧制异形断面轧件时（参见图 4.2-10e），由于各部分金属的不均匀延伸，使轧件产生纵向附加拉应力或附加压应力，影响轧件的纵向变形和横向变形。例如，轧制工字钢时，如果腰部延伸不等于翼缘延伸，由于工字钢轧件是一个整体，延伸大的部分受延伸小的部分的牵制，使延伸大的部分受到纵向附加压应力，而延伸小的部分受到纵向附加拉应力，这就改变了原来金属流向，使轧件变形区内金属变形非常复杂。

此外，轧件在孔型中轧制时，轧件除受摩擦阻力外，还受到孔型侧壁的侧向力作用，使轧件在凹形孔型中轧制时横向宽展受到限制，而在凸形孔型轧制时则要产生强制宽展。金属变形与板材在平辊上轧制时的自由宽度是不同的，也会使轧件产生不均匀变形。

由上可见，轧件在孔型中轧制时由于各种因素会产生严重的不均匀变形，对轧制产品的质量、能耗、轧辊消耗等都有不利的影响。

1.3　轨梁和大、中型型钢生产

(1) 轨梁生产的工艺流程。轨梁是钢轨、钢梁的总称。它包括钢轨、工字钢等大型断面异形型钢。

钢轨的规格是以每米长的质量 (kg/m) 来表示。通常将 30 kg/m 以下的钢轨称为轻轨，超过 30 kg/m 以下的钢轨称为重轨。轻轨主要用在矿山和森林等内部的短途、低速、轻载的运输线上，重轨主要用于长途、重载、高速的铁路干线上。此外，还有起重机轨和电车轨（图 4.2-12）。

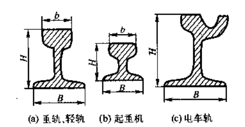


图 4.2-12　钢轨断面图

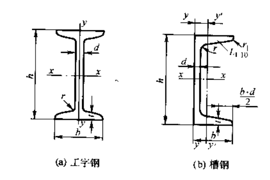
工字钢和槽钢（图 4.2-13）都是以其腰部高度 h 尺寸来确定规格大小，通常以 h (mm) 的 1/10 表示其规格号码。工字钢规格范围为 8~63 号 (No.8~No.63)，即其腰部高度为 80~630 mm。槽钢规格范围为 5~45 号 (No.5~No.45)，



即其腰部高度为 50 ~ 450 mm。其中，No.20 ~ No.63 工字钢为大型工字钢，No.18 ~ No.45 槽钢为大型槽钢。

1）钢梁和方、圆钢的生产工艺流程。重轨和大型断面钢梁是在轨梁轧机上生产的。轨梁轧机是综合钢轨、钢梁轧机和专业化的钢梁轧机或钢轨轧机的统称。轨梁轧机是最大的型钢轧机，其轧辊名义直径为 750 ~ 900 mm。除生产重轨和大型断面钢梁外，还可以生产边长或直径为 100 ~ 350 mm 方钢或圆钢以及 H 型钢、拖拉机履带其他大型断面的异形型钢。图 4.2-14 和图 4.2-15 分别表示了方钢或圆钢和钢梁等异形型钢的生产工艺流程图。

2）重轨的生产工艺流程。重轨是轨梁轧机中生产工艺最复杂的产品。由于使用性能上的要求，重轨轧制后进行切断、冷却、矫直等工序外，还要进行端头加工、轨端淬火或轨头全长淬火，以及多次检查等工序。图 4.2-16 表示了重轨的生产工艺流程图，其中包括普通钢轨、轨端淬火钢轨和轨头全长淬火钢轨。



(a) 工字钢　　(b) 槽钢

图 4.2-13　工字钢和槽钢断面形状图

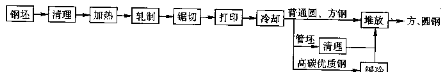


图 4.2-14　方钢或圆钢的生产工艺流程图

图 4.2-15　钢梁等异形型钢的生产工艺流程图

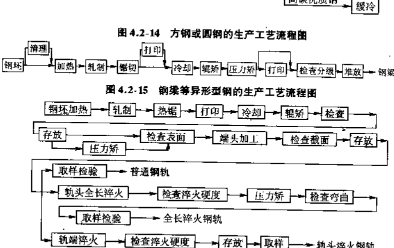


图 4.2-16　重轨生产工艺流程图

图 4.2-16 中的端头加工主要是对钢轨端部进行铣头和钻孔。铣头是将钢轨两端加工平整，并与轨身垂直，同时保证钢轨准确的定尺长度。钻孔是离轨端一定距离的轨腰处进行钻孔，这是为铺设轨道时联接相邻两根钢轨的联接用孔。此外，因火车车轮在通过钢轨接头处会产生较大的振动和冲击，故要求钢轨轨端有足够的强度、韧性和耐磨性，以免由于轨端过早报废而影响钢轨寿命。因此轨端需要淬火提高其力学性能。即将钢轨两端 80 ~ 100 mm 长的一段用高频感应方法加热至 880 ~ 920°C，然后喷水急冷淬火至 450 ~ 480°C，再利用钢轨余热回火，使其得到所需要求金属组织和力学性能。轨头淬火后可提高其耐磨性约 2.5 倍。

轨头全长淬火是将钢轨头部上表面全部进行淬火处理，其目的是提高整根钢轨头部的强度、韧性和耐磨性，以适应高速重载火车的运行，以及在弯道、隧道等特殊地段的要求。轨头全长淬火经常采用的方法是中频感应加热，然后水淬。国外一般采用 2 500 Hz 中频感应加热，连续水淬，钢轨移动速度在 1 m/min 以下。我国也有采用双频感应加热的。双频加热是先用 50 Hz 工频将钢轨整体加热至 550 ~ 600℃，然后用 2 500 Hz 中频加热轨头至 900 ~ 950℃，再喷雾冷却进行轨头全长淬火，然后利用余热自身回火，钢轨的移动速度为 1.2 m/min。双频感应淬火后，钢轨弯曲度可控制在千分之四以内，断裂强度 σ_b 提高 23% ~ 42%，屈服强度 σ_s 提高 59% ~ 114%，冲击韧度提高 87% ~ 287%。

应该指出，在某一现代化轨梁车间，也有采用淬火炉和回火炉进行轨头全长淬火的。淬火炉长度为 2930 mm，炉温 1 150℃，钢轨入炉速度为 6 mm/s，钢轨加热到 800℃后进行连续淬火，紧接着进入长度为 3 400 mm 的回火炉，回火温度 570℃。当钢轨通过上述两个炉子时，轨头以下部分用水管冷却，炉内保持还原性气氛以防止钢轨脱碳。轨头全长淬火后，钢轨弯曲度为 200 mm/25 m，轨头硬度达 380HB 以上。

轨头全长淬火是更能保证和提高钢轨质量的一种热处理工艺，具有较好的发展前景。

（2）轨梁轧机的类型和布置型式

轨梁轧机的结构有二辊式、三辊式和万能式轧机，其布置型式可分为横列式和半连续式两种型式。

1）横列式轨梁轧机。横列式布置是指由若干架轧机的工作机座横向布置成一列。横列式轨梁轧机有一列式、二列式和三列式三种（图 4.2-17）。

① 一列式轨梁轧机。通常由 3 ~ 4 架三辊式轧机组成，而最后一架成品轧机也有用二辊轧机的。轧辊直径为 800 ~ 950 mm，轧制速度为 3.5 ~ 7 m/s。轧机由一台或二台直流电动机驱动。如用二台电动机驱动时，则成品轧机单独用一台电动机驱动。

由于轧机数量少且无开坯轧机，轧件轧制道次受到限



制，产品的种类和规格受到一定的影响，此类轧机只能轧制44~50 kg/m 重轨，No.20 ~ No.50 工字钢，直径为 80 ~ 160 mm圆钢等产品。而且，当用一台电动机驱动轧机轧辊时，不能按各轧制道次的速度要求来调整各轧机的轧辊转速，这不仅会降低轧机产量，还会影响产品质量与轧制精度。

② 二列式轨梁轧机。通常第一列轧机为一架轧辊直径为 900 ~ 950 mm 的二辊可逆式开坯轧机，用一台直流电动机驱动。第二列由三架轧机组成。其中，前二架轧机是轧辊直径为 500 ~ 850 mm 的三辊式轧机，由一台直流电动机驱动。最后一架是二辊不可逆式的成品轧机，轧辊直径为 750 ~ 850 mm，轧制速度为 5 ~ 7 m/s。

与一列式轨梁轧机相比，其投资虽然稍大，但其产量能增加 30% ~ 40%。而且，由于设置了开坯轧机，可以使用 $250 \times 250 \sim 320 \times 330$ mm^2 的大断面钢坯，有利于扩大轨梁轧机的品种规格，可以轧制 44 ~ 75 kg/m 的重轨，No.20 ~ No.60 的工字钢、直径为 100 ~ 300 mm 的圆钢等产品。成品轧机采用单独驱动，不仅在轧辊转速调整上有较大的灵活性，也增大了第二列轧机的驱动能力。综上优点可知，二列式轨梁轧机是一种应用较广的典型的轨梁轧机。

③ 三列式轨梁轧机。其布置形式是把成品轧机单独布置成第三列，其他布置情况与二列式轨梁轧机基本相同。这虽能使厂房宽度可以窄些，但增加了厂房长度。由于第三列和第二列之间距离较大（往往大于 80 m），不利于轧机的调整和事故的处理。因此，一般不采用这种布置形式。

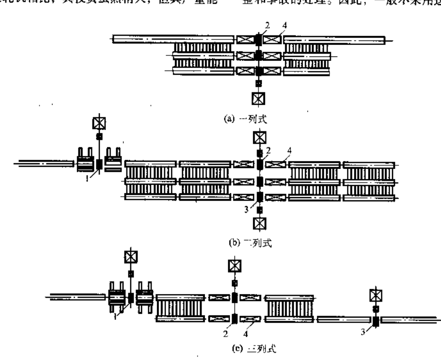


图 4.2-17 横列式轨梁轧机的主要布置形式

1—开坯轧机（二辊可逆式）；2—三辊式轧机；3—二辊式轧机；4—升降台

2）半连续式万能钢梁轧机。为了实行专业化生产，轧梁轧机有专门用于生产大型断面的工字钢、槽钢等产品的万能式钢梁轧机，也有用于生产重轨的万能式重轨轧机。

如前所述，万能轧机是由四个轧辊组成所轧制钢材断面所需的孔型，是一种多辊轧制法，比二辊轧制法具有较多的优点，对于轧制复杂断面的重轨、工字钢、槽钢以及 H 型钢是一种较为适宜的轧制方法。

图 4.2-18 为半连续式万能钢梁轧机。它由一架二辊式开坯轧机、两个可逆式中间机组和一架万能式精轧机组成。每一个中间机组是由一架万能式轧机和一架二辊式轧边机组成。万能式轧机的水平辊是驱动的，立辊为不驱动的被动辊而其轴线与水平辊的轴线处于同一垂直平面内。在万能式轧机上，轧件的腿部和腰部在厚度上能同时受到压缩，面在轧边机上，轧辊不与轧件腰部接触，仅对轧件腿部进行压缩，故称为轧边机。图 4.2-18 中的第一个中间机组为粗轧机组，为了控制开坯轧机所供坯料的腿高，将轧边机置于万能式轧机之前。第二个中间机组为中轧机组，为了能保证腿高，将轧边机置于万能式轧机之后。由于万能式轧机与轧边机具有连轧性质，即轧件同时在二个轧机中进行连续轧制（图 4.2-19），但在开坯轧机、粗轧机组、中轧机组和精轧机组之间不是连续轧制，这种布置型式的万能钢梁轧机称为半连式万能钢梁轧机。

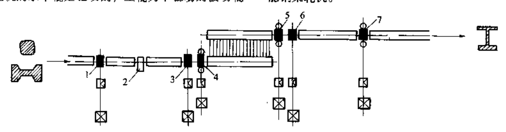


图 4.2-18 半连续式万能钢梁轧机

1—二辊可逆式开坯轧机；2—热锯机；3、4—粗轧机组（3 为轧边机，4 为万能式轧机）；
5、6—中轧机组（5 为万能轧机、6 为轧边机）；7—万能式精轧机

应该指出，在轨梁和大型轧机上采用连续式生产的发展速度十分缓慢，但在20世纪70年代以后，也逐步实现了中轧机组和精轧机组之间的连续轧制，其轧制技术也在不断地发展。

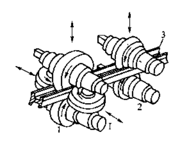


图 4.2-19 万能式轧机与轧边机
1—万能式轧机；2—轧边机；3—轧件

（3）大、中型轧机布置型式

通常将轧辊名义直径500～750 mm的型钢轧机称为大型轧机，轧辊名义直径350～500 mm的型钢轧机称为中型轧机。应该指出，按轧辊名义直径来划分大型和中型轧机的区分实际上并不严格。近些年，也有将轧辊名义直径650～850 mm的型钢轧机定为大型轧机，将轧辊名义直径350～650 mm的型钢轧机定为中型轧机。大、中型轧机生产的部分产品范围参见表4.2-5。大、中型轧机的主要布置型式有横列式、纵列式、连续式和半连续式等。

1）横列式。横列式大、中型轧机与横列式轨梁轧机相似，主要有一列式和二列式两种基本类型，而以二列式应用较多。二列式大型轧机的第一列一般采用二辊可逆式开坯轧机，第二列则采用三架三辊式轧机，或采用两架三辊式轧机和一架单独传动的二辊式轧机。二列式中型轧机的第一列可以采用1～2架三辊式开坯轧机，第二列一般为4架三辊式轧机分两组传动。横列式轧机的优点是投资少，轧机调整方便、喂钢顺利。其缺点是用于轧件横移的间隙时间长，轧制速度慢、温降大。

2）纵列式。这种布置型式是轧机沿车间纵向布置成相互平行的1～3条直线，如图4.2-20所示。每架轧机单独传动，且每架轧机只轧一道，轧件在一条轧制线上进行跟踪轧制，但不形成连轧，故纵列式又称为跟踪式。由于不形成连轧，各架轧机互不干扰，调整方便且转速可调能充分发挥轧机能力，大型轧机采用这种布置型式，年产量可达160万t以上。其缺点是轧机数目多、投资大，而且轧机布置分散，轧机之间间距大，厂房较长，轧件温降大，故仅适用于大、中型轧机，但不适宜轧制薄壁的产品。为了弥补上述缺点，近年来采用这种布置型式时，轧机进行可逆轧制，从而减少轧机数目和厂房长度。

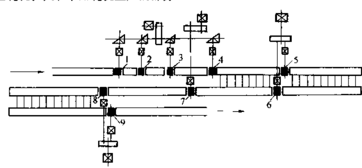


图 4.2-20 500 纵列式大型轧机
1～4架为600轧机；5～9架为600轧机

3）连续式和半连续式。为了进一步提高产量，出现了连续式布置型式。各轧机沿轧制线依次排列，轧机架数就等于轧件所需的轧制道次数。而且，各机架之间的距离要比相应的轧件长度小，使轧件能同时在几个轧机中连续轧制。轧件在连续轧制时，为了不使轧件在轧机之间拉断或产生很大的活套，各轧机的道度应符合“秒流量相等”的原则。也就是说，要使每秒内通过每一架轧机的金属体积相等。因轧件断面随着轧制道次的增加越来越小，故各轧机的轧制速度随轧件长度的增加而增加。

连续式布置的轧机因轧制速度快，轧制时间短，故有较高的生产率，而且，因轧制速度快，轧件温降慢，轧件温度比较均匀，钢材性能也好。目前连续式轧机厂泛用于小型轧机、线材轧机，以及带材和钢管轧机。在大、中型型钢轧机上采用连续式布置型式的发展速度较为缓慢，因其生产的产品断面形状较为复杂。但随着科技进步和轧钢生产技术水平的不断提高，也会逐步出现连续布置的大、中型轧机。在国外已经出现了连续式中型轧机，除能轧制圆钢、方钢等简单断面产品外，也能轧制复杂断面的槽钢、工字钢及其薄壁经济断面的钢材。连续式中型轧机具有较高的轧制速度，可达16 m/s，具有很高生产率，年产量可达90万t。连续式中型轧机的缺点是轧制型钢的品种范围窄，受到一定的限制。

半连续布置的轧机通常是指连续式布置的轧机与其他布置型式的轧机的组合。半连续式中型轧机，根据其连续式布置轧机部分的位置不同，有不同的组合形式。例如，有的是粗轧机组为连续式，其后的轧机布置成横列式或纵列式；有的则设有二辊或三辊开坯轧机，将粗轧机组或精轧机组布置成连孔。总之，轧机组合型式的确定必须考虑轧制产品的品种特色和产量的大小。半连续式中型轧机常用于轧制合金钢或对旧车间的改造。

1.4 小型型钢和线材生产

（1）小型型钢生产

1）品种和规格。常见的小型型钢品种和规格如表4.2-6所示。小型型钢是在轧辊名义直径为ϕ250～350 mm的小型轧机上生产的。

表 4.2-6 小型型钢品种规格

品种	规格范围
圆钢	直径 ϕ9～50
方钢	边长 8～50 mm
带螺纹钢筋（螺纹钢）	外径 ϕ6～28
等边角钢	No.2～No.8
工字钢	No.5～No.8
槽钢	No.5～No.8
扁钢	厚度×宽度：（4～30）mm×（25～160）mm
六角钢	对边距离 5～16 mm

2）工艺流程及轧机布置型式。小型型钢生产工艺流程如图4.2-21所示。



钢锭(坯)→加热→轧制→卷取→冷却→检查→包装→称重标记→入库
表面清理　剪切
剪切→冷却→矫直→剪定尺→检查→打捆

图 4.2-21　小型型钢生产工艺流程图

在小型型钢生产中，轧机布置型式主要有横列式、半连续式和连续式三种。

① 横列式小型轧机。目前，我国横列式小型轧机还有相当数量。这种轧机由于投资少、易于建造、投产快、能够进行多品种生产等优点，在地方钢铁工业建设中得到了一定的发展。但是，随着生产和技术的发展，横列式小型轧机在轧制时的某些缺点，例如：轧件横移次数多、轧制速度低、轧件温降及头尾温差大等，对于轧件断面小而长度大的小型型钢产品的产量和质量具有较大的不利影响。根据我国目前的技术政策，将要逐步取消或改造这种横列式轧机。

② 半连续式小型轧机。这种型式的轧机是由横列式机组和连续式机组组成的。图 4.2-22 表示了两种半连续式小型轧机布置图。如图 4.2-22a 所示，其粗中轧机组布置为连续式，这是因为其轧件断面简单，且对成品的尺寸精度影响较小，故可进行连续轧制。精轧机组则布置成横列式，这是因为精轧机组轧件断面复杂，孔型磨损也较快，为了便于轧机调整，就布置横列式。图 4.2-22b 则在横列式精轧机组后，增加了可进行连轧的第二精轧机组，这有利于提高轧件轧制速度，减小轧件温降，对提高轧件精度是有利的。

③ 连续式小型轧机。这种轧机具有较高的生产能力，机械化和自动化程度高，轧制速度高、轧件温降小，产品尺寸精度有较大的提高。虽然其投资大，建设周期长，轧机调整困难，但仍是一种先进的轧钢设备，适用于产量大而品种少的小型型钢生产。图 4.2-23 表示了某一单线连续式小型轧机的布置图，其粗轧和精轧机组均为连续式布置，在机组中还配置了立辊轧机。

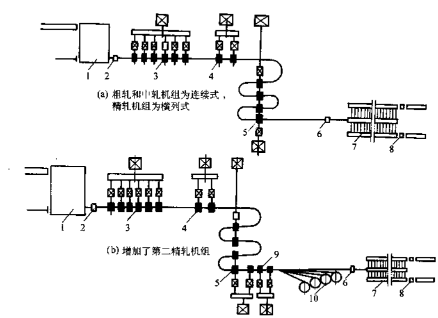


图 4.2-22　半连续式小型轧机布置图

1—加热炉；2—事故剪；3—粗轧机组；4—中轧机组；5—精轧机组；6—飞剪；7—冷床；8—冷剪；9—第二精轧机组；10—卷取机

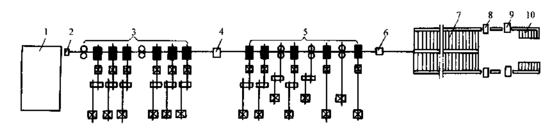


图 4.2-23　单线连续式小型轧机布置图

1—加热炉；2—剪切机；3—粗轧机组；4—1 号飞剪；5—精轧机组；
6—2 号飞剪；7—冷床；8—冷剪；9—矫直机；10—检查台

(2) 线材生产

1) 线材生产特点。线材是在热轧型钢中断面尺寸最小、长度最长、且成盘卷状的钢材。在我国现行标准中，线材主要是指直径为 $\phi5 \sim \phi9$ mm 且呈盘卷状交货的热轧圆钢，在国外已将线材范围扩大到 5 ~ 42 mm。线材断面的种类可分为圆形、方形、螺纹圆形、螺纹扁形、Z 字形等，但主要的还是圆形以及螺纹圆形断面。线材主要用途有两种，一是用作建筑材料，二是作为进一步通过冷拔、冷弯等工序，再加工成钢丝、弹簧等产品的原料。线材应用范围相当广泛，各国线材产量约占热轧钢材总产量的 5% ~ 14%，我国约占 10% 左右。

由于线材形状是断面小而长度大的特点，线材在轧制过程中温降快，头尾差大。由于温度沿轧件长度波动大，会造成尺寸偏差。同时线材轧后卷取成盘，在冷却过程中也不是均匀冷却，线材组织性能沿长度方向不均，这就促使线材生产工艺进行不断的改造和发展。

一般线材轧机分为粗轧、中轧、精轧机三个机组，线材车间的轧机最多，为保证终轧温度，在断面小、轧制道次多的情况下，只有使轧制速度向高速发展才能解决温降大的矛盾。所以线材生产由横列式发展到连续式，并且向着连续化、高速化、自动化、高精度化方向发展。目前，高速无扭线材轧机的轧制速度已达 100～120 m/s，甚至可达 140 m/s。现代线材轧机不仅轧制速度快，进行无扭轧制轧件精度也高，再加上轧后的控制冷却，可满足对线材产品尺寸精度及表面质量高的要求。

2）线材生产的工艺流程和轧机的布置型式。线材生产的一般工艺流程如图 4.2-24 所示。

由于各线材生产的具体情况不同，其工艺流程也不相同。大多数线材生产粗轧后不切头，精轧后的散卷冷却工序一般在现代化连续轧机上使用。

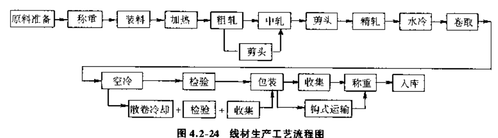


图 4.2-24 线材生产工艺流程图

在线材生产中，轧机布置型式主要有横列式、半连续式和连续式三种，其特点与小型型钢轧机的布置特点相近，但结合线材生产特点，也出现以下不同的布置形式。

① 复二重式线材轧机（中轧和精轧机组为复二重式轧机）。这种轧机是改进的半连续式线材轧机，其布置型式如图 4.2-25 所示。它的特点是，在轧制过程中轧件既有连轧关系，又有在轧机间因不符合连轧关系而有活套的存在。复二重轧机是两两一组，一组内的两台轧机连轧，为避免机架间堆钢并保证小断面轧件的稳定轧制，在两机架间应人为地造成拉钢，实现微张力轧制。

相对于横列式线材轧机，复二重式线材轧机是一个进步，它基本上解决了轧件温降快的问题，并且轧制较为稳定，便于调整。在 1960～1980 年间，这种轧机在我国得到一定的发展。但与连续式线材轧机，特别是高速无扭线材轧机相比，其工艺稳定性和产品精度都较差，而且劳动强度大。盘重小（80～200 kg），轧制速度低（12.5～20 m/s）等不利因素，根据我国目前的技术政策，也将要逐步淘汰或改造这种轧机。

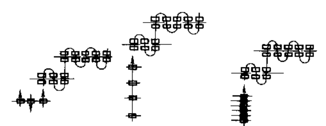
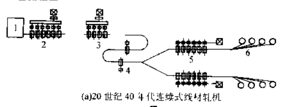


图 4.2-25 复二重式线材轧机布置图

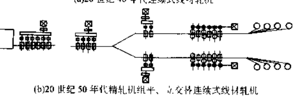
② 连续式线材轧机。这种轧机一般分为粗轧、中轧、预精轧和精轧机组，预精轧机组其实是一组中轧机组。

20 世纪 40 年代的连续式线材轧机主要是集体传动的水平轧机，精轧机组则为多线连轧，在中轧机组和精轧机组间设置两台单独传动的预精轧机组（图 4.2-26a）。由于在轧制过程中轧件要扭转翻钢，轧制速度不能太高，一般为 20～30 m/s。20 世纪 50 年代中期开始，轧机采用直流电动机单独传动，精轧机组采用了平、立轧机交替布置的型式（图 4.2-26b），轧制速度提高到了 30～35 m/s。但由于机架间间距较大，轧件咬入瞬间各架轧机产生了动态速降，影响了轧制速度的进一步的提高。

在 20 世纪 60 年代开始发展了高速无扭线材精轧机，使线材轧制速度得到较大的提高。



(a)20 世纪 40 年代连续式线材轧机



(b)20 世纪 50 年代精轧机组平、立交替连续式线材轧机

图 4.2-26 连续式线材轧机布置图

1—加热炉；2—粗轧机组；3—中轧机组；4—预精轧机组；5—精轧机组；6—卷线机

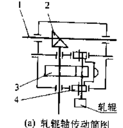
所谓高速线材轧机，一般是指轧制速度高于 40 m/s 的线材轧机。20 世纪 60 年代中期，其轧制速度可达 43～50 m/s，而在 70 年代，轧制速度一般为 50～75 m/s，目前已能达到 100～120 m/s。表 4.2-7 列出了高速线材轧机各代次轧制速度和成品盘重的技术特性

表 4.2-7 高速线材轧机各代次轧制速度和成品盘重技术特性

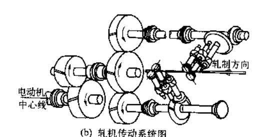
代次	年度	轧制速度/$m \cdot s^{-1}$			成品盘重/t
		保证速度	设计速度	极限速度	
1	1965～1970	43	50	60	0.7～1.0
2	1970～1975	50	60	72	1.0～2.0
3	1976～1978	65	75	90	1.5～2.0
4	1979～1985	75	90	112	1.8～2.5
5	1986～1989	90	108	130	1.8～3.1
6	1990 至今	100	120	140	1.8～3.1

高速线材轧机之所以能提高轧制速度，主要是从轧机结构上解决了高速轧制时轧机的振动问题。其解决方法是取消了普通轧机上与轧辊连接的接轴或联轴器，而采用了精密曲线锥齿轮与斜齿轮轧辊轴直接连接（图 4.2-27a）。由于轧辊无接轴连接，可使其具有较好的动平衡，能保证轧机在高速下运行平稳，大大降低了轧机的振动，摩根（MORGAN）45°高速无扭轧机在轧制时的最大振幅为 0.025～0.051 mm。此外，只要提高传动零件的加工精度也就能提高轧制速度，故其传动齿轮均按航空齿轮精度要求加工。





(a) 轧辊轴传动简图



(b) 轧机传动系统图

图 4.2-27　摩根 45°侧交高速无扭转线材轧机
1—长轴；2—锥齿轮；3—同步齿轮；4—偏心套

高速线材轧机实现无扭轧制，除了采用平、立交替布置的型式外，还可采用 45°布置型式（图 4.2-27b），即为了使相邻轧机轧辊轴线交错互成 90°，而将轧机与水平面成 45°布置，故称为 45°轧机。此外，还有将轧机与水平面成 15°/75°以使相邻轧机轧辊轴线交错成 90°。表 4.2-8 列出了美国摩根 45°侧交轧机，德国德马克（DEMAG）15°/75°侧交轧机、英国阿希洛（ASHLOW）45°顶交轧机（图 4.2-28）以及意大利达涅利（DANIELI）平直轧机四种高速无扭线材精轧机组的技术特性。

为了提高轧件尺寸精度，高速无扭线材精轧机也有采用 Y 型轧机的（参见图 4.2-7）。但由于其结构及密封等限制，其轧制速度一般不超过 60 m/s。

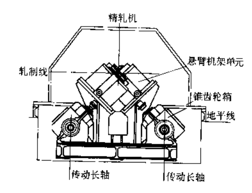


图 4.2-28　阿希洛顶交轧机

表 4.2-8　四种高速无扭线材精轧机组的技术特性

No	参数名称 \ 机型	摩根标准型	德马克型	阿希洛型	达涅利型
1	机型形式	45°侧交标准型	15°/75°侧交	45°顶交	平辊 - 立辊
2	机组机架数目	8 ~ 10	8 ~ 10	8 ~ 10	8 ~ 10
3	传动方式	集中传动	集中传动	集中传动	集中传动
4	主电机功率/kW	2 × 1 650 ~ 1 950	2 × 1 400 ~ 1 750 3 × 1 600	2 × 1 500 ~ 1 750	2 × 1 650 ~ 1 800 3 × 1 350
5	机架间间距/mm	750/635	800/700	920	700/650
6	轧辊直径/mm	210 × 2/150 × 8	210 × 10	210 × 10	210 × 2/160 × 8
7	轧辊支承方式	悬臂式	悬臂式	悬臂式	悬臂式
8	轧辊材质	碳化钨	碳化钨	碳化钨	碳化钨
9	孔型系统	椭圆 – 圆	椭圆 – 圆	椭圆 – 圆	椭圆 – 圆
10	更换孔型方法	辊环翻转 180°及加垫片	辊环翻转 180°	辊环翻转 180°	辊环翻转 180°
11	轧机调整方式	轴向固定，径向可调	轴向固定，径向可调	轴向固定，径向可调	轴向固定，径向可调
12	换孔型或换机架时间/min	5 ~ 7	5 ~ 7	5 ~ 7	5 ~ 7
13	精轧机最大轧制速度/ms^{-1}	120	120	100	100
14	可达到的尺寸偏差/mm	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
15	机组质量/t	72.5	99	~ 80	66.5

1.5　型钢生产发展趋势和轧制新技术

（1）型钢生产发展趋势

在型钢生产中，轨梁和大、中型型钢轧机在向连续化、自动化和万能轧制法发展。小型、棒线材轧机在向高速化和连续化方向发展。在高速化方面，如表 4.2-7 所示，高速线材轧机的轧制速度已达到了 120 ~ 140 m/s。小型棒材轧机的轧制速度虽受冷床速度的影响，但其轧制速度亦已达到了 18 ~ 23 m/s。此外，随着连铸技术的发展和进步，型钢轧机的坯料已越来越多地采用了连铸坯。在现代钢铁企业中，连铸坯热装热送在型钢生产中亦正在成为一种新的生产流程。所谓连铸坯热装热送，即是连铸坯从连铸机出来后，不经加热，或经保温炉保温，或连铸坯在较高温度下进入加热炉加热后进行轧制，这可进一步实现炼钢与轧钢生产的合理匹配。下面就型钢轧机连续化和连铸坯热装热送问题作一简单介绍。

1）型钢轧机连续化。长期以来，轨梁和大、中型型钢轧机连续化的发展较慢。大型型钢半连续式布置的轧机多见于万能连轧机组，在万能连轧机组前有一台或两台二辊可逆式开坯机，万能连轧机组由 5 ~ 9 架万能轧机和 2 ~ 3 架轧边



机组成。由于市场对大、中型型钢常常要求多规格、小批量，故对其连续化的发展受到一定的制约。但是，在小型、棒材轧机上连续化发展较为迅速，在2002年，我国小型连轧和高速线材比例已超过预定的50%的目标（高速线材比例已达63%），今后还会有较大的发展。我国新建的小型、棒线材轧机基本上实现了连续化。表4.2-9为我国20世纪90年代投产的部分小型棒材连轧机的技术特性。表4.2-10则为1987～1998年投产的部分高速线材连轧机的技术特性。

表4.2-9　我国20世纪90年代投产的部分小型棒材轧机技术特性

企业名称	设计生产能力/万 ta^{-1}	投产日期	轧机型式	终轧速度/ms^{-1}
广州钢铁集团公司	40	1994.3	ϕ650×1　ϕ550×2 ϕ480×3（HV） ϕ380×6（HV） ϕ340×6（HV）	
新兴铸管（集团）公司	75	1994.7	ϕ550×4/ϕ450×2（H） ϕ450×4/ϕ370×2 ϕ370×3/ϕ300×3（HV）	18
首钢总公司	75	1994.7	ϕ550×5/ϕ430×2（H） ϕ400×6（2V）/ϕ330×4（H） ϕ320×4（2V）	
莱芜钢铁公司	40（50）	1996	粗轧机为悬臂辊环式、精轧机为短应力线式 ϕ650×3/ϕ550×3 ϕ450×6 ϕ450×3/ϕ350×3 全部HV	15
唐山钢铁集团公司	60	1996.6	粗轧机为悬臂辊环式、精轧机为短应力线式 ϕ685×4/ϕ510×2 ϕ460×6 ϕ450×2/ϕ365×4 全部HV（多线切分、无头轧制）	18
杭州钢铁集团公司	30	1996.8	粗轧机为闭口机架，中、精轧机为短应力线式 ϕ600×5/ϕ500×4 ϕ400×6/ϕ320×3 全部HV	18
江阴兴澄钢铁公司	50（70）	1998	ϕ670×4（VHHV）/ϕ760×3（H） ϕ470×4/ϕ670×5	6
江苏淮钢集团公司	40	1998	粗轧机为悬臂辊环式、精轧机为短应力线式 ϕ685×3/ϕ585×3（HV） ϕ470×3/ϕ370×3（HC）	18

表4.2-10　我国1987～1998年投产的部分高速线材连轧机技术特性

企业名称	设计生产能力/ta^{-1}	投产时间	终轧保证速度/ms^{-1}	轧机型式及组成
马钢集团	40	1 987.5	75	双线侧交45°摩根型 粗轧机7架；中轧机4架；预精轧机4×2架；精轧机10×2架
鞍山钢铁集团公司	50/70	1987.7	50/75	双线侧交45°摩根型 粗轧机7架；中轧机6架；预精轧机4×2架；精轧机10架
宝钢集团上海二钢公司	52	1987	76.2	双线侧交45°摩根型 粗轧机8架；中轧机6架；预精轧机4×2架；精轧机8×2架
酒泉钢铁集团公司	40	1988.10	90	单线15°/75°侧交德马克型 粗轧机9架；中轧机4架；预精轧机4架；精轧机10架
唐山钢铁集团公司	35	1989.7	90	单线15°/75°侧交德马克型 粗轧机4架；中轧机5架；预精轧机6架；精轧机10架
首钢总公司	90/115	1993	70	4线侧交45°摩根型 粗轧机7架；中轧机6架；预精轧机4×4架；精轧机10×4架





续表 4.2-10

企业名称	设计生产能力/ta⁻¹	投产时间	终轧保证速度/ms⁻¹	轧机型式及组成
大钢集团公司	35	1995.4	100	单线顶交45°摩根型 粗轧机6架；中轧机6架；预精轧机6架；精轧机10架
湘潭钢铁公司	38	1995.10	105	单线顶交45°超重摩根型 粗轧机6架；中轧机8架；预精轧机6架；精轧机10架
江苏沙钢集团公司	63	1996.8	105	单线顶交45°超重摩根型 粗轧机6架；中轧机4架；预精轧机4架；精轧机10架
武汉钢铁（集团）公司	70	1996.8	105	双线顶交45°超重摩根型 粗轧机6架；中轧机10架；预精轧机4×2架；精轧机10×2架
上海宝钢股份公司	40	1998	120	单线顶交45° 粗轧机6架；中轧机8架；预精轧机4架；精轧机8架；Tekisun4架

注：Tekisun轧机是一种高精度棒线材轧机，可使 ϕ5～50 mm线棒材的尺寸精度均达到±0.1 mm。这种轧机的核心是3架安装在同一底座上的平（H）一立（V）一平一（H）紧凑布置的二辊轧机，其轧辊直径较大，辊身较短，故辊系刚度很大。

2）连铸坯热装热送。采用连铸坯热装热送技术，可以降低燃料消耗、减少坯料烧损、缩短生产周期和减少坯料库存量等优点，具有较大的经济效益。一般来说，连铸坯每提高100℃热装温度，轧钢加热可节约燃料5%～6%，燃料消耗将随热装温度和热装率的提高而大幅度降低，可节约50%～80%的燃料。

根据连铸机和有关轧机设备布置以及连铸坯热装温度的不同，连铸坯热装热送技术有连铸坯直接轧制，连铸坯热送直接轧制，连铸坯直接热装轧制和连铸坯热装轧制四种型式。

① 连铸坯直接轧制（Continuous Casting-Direct Rolling，简称为CC—DR），连铸坯温度在1 100℃以上，不低于轧件的开轧温度时，这就不再在加热炉中进行加热。或者只是在辊道上输送过程中通过对坯料边角补热装置进行均温后，直接送入轧机进行轧制。

② 连铸坯热送直接轧制（Continuous Casting-Hot Direct Rolling简称为CC-HDR）。连铸坯温度已经低于开轧温度以下（一般在1 100℃以下），而在 Ar_3 温度（钢中奥氏体开始析出铁素体时的温度）以上时，可以不通过加热炉加热而在辊道上通过补热和均热装置使坯料达到开轧温度后，再送入轧机进行轧制。如果不具备辊道上的补热和均热装置，则可以将连铸坯送入加热炉中加热至开轧温度后送入轧机轧制。

③ 连铸坯直接热装轧制（Continuous Casting-Direct Hot Charging Rolling，简称为CC-DHCR）。连铸坯温度已经降到 Ar_3 温度以下，而在 Ar_1 温度（钢中奥氏体开始析出铁素体和渗碳体的共析混合物时的温度）以上时，则要将连铸坯送入加热炉进行加热，达到开轧温度后送入轧机进行轧制。

④ 连铸坯热装轧制（Continuous Casting-Hot Charging Rolling，简称为CC-HCR），连铸坯温度已经低于 Ar_1 温度，而在400℃以上时，则将连铸坯送入保温设备（保温坑、保温车和保温箱等）使其不再继续冷却。然后再送入加热炉中加热至开轧温度后送入轧机轧制。保温设备在连铸机和加热炉之间起到缓冲协调作用。

一般将连铸坯温度400℃作为热装的最低温度，400℃以下热装的节能效果较小，故不再算是热装了。

（2）型钢轧制新技术

为了不断地提高型钢产品的产量和质量，并能进一步降低生产成本，型钢生产在向连续化、高速化和自动化发展的同时，在型钢轧制方面也出现了一些新技术。例如：无头轧制、低温轧制、无孔型轧制（平辊轧制）、减轻和定位技术、切分轧制技术等。本节主要介绍前三项新技术，而后两项新技术可分别参见“3.2第（2）4）”和“4”节。

1）无头轧制。无头轧制是在轧机一个换辊周期内，轧件长度上可以不间断地进行轧制。实现无头轧制的方法是将后一根的坯料头部与前一根坯料尾部焊接在一起，这样就能使轧件“无头”地进行不间断地轧制。

坯料焊接可采用飞焊机或固定焊机进行。图4.2-29为飞焊机结构示意图。坯料1通过液压缸4和钳口6夹持在焊机小车8上，焊机小车可随坯料同步移动，在坯料行进过程中进行焊接，图中5为前后两根坯料的焊口。图4.2-30为带有双线固定焊机在焊接区的平面布置简图。坯料从加热炉辊道出来后，经夹送辊2和头部氧化皮清理装置3，清除坯料端部的氧化皮后，进入固定焊机4与前一根坯料进行焊接。焊后的坯料通过毛刺清除器5和校正焊接部位的校正器6，然后进入具有保温作用的活套坑7，活套坑可起到缓冲作用。为了能使坯料温度达到开轧温度，在活套坑7后设有直通式感应加热炉8，坯料从炉中出来后，用刨刀式清除器进一步清除焊瘤。为了能及时处理事故，在第一架粗轧机前设有事故剪10。

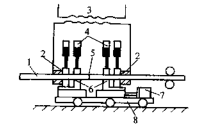


图4.2-29　飞焊机结构示意图

1—坯料；2—输电夹；3—变压器；4—液压缸；5—焊口；6—钳口；7—压紧缸；8—焊机小车

无头轧制具有以下优点：

① 消除了两根坯料之间的间隔时间，轧机利用系数提高，轧机作业率可达90%以上，生产能力提高10%～12%。

② 在轧制过程中减少了切头切尾的消耗，并消除了因坯料咬入不良而产生的中间废品，可使金属收得率提高3%。

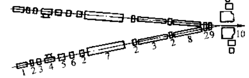


图 4.2-30 带有双线固定焊机在焊接区的平面布置图

1—炉子辊道；2—夹送辊；3—头部氧化皮清理装置；4—固定焊机；5—毛刺清除器；6—校正器；7—活套坑；8—感应加热炉；9—刨刀式清除器；10—事故剪

③ 由于轧件进行不间断地轧制，轧制过程稳定，减少了轧制事故的发生和设备的维护量，并能为进一步提高轧机轧制速度和整个生产过程自动化创造了有利条件。

无头轧制是在 20 世纪 90 年代中期由日本钢管公司（NKK）和意大利达涅利（DANIELI）公司开发成功。目前我国已有唐钢、涟钢小型轧机及邢钢二高线厂高速线材轧机分别引进了无头轧制技术，并取得了良好效果。

2）低温轧制。低温轧制是降低坯料的开轧温度，以节约燃料消耗，也可提高产品的表面质量和机械性能，适用于棒线材连轧机上。一般来说，低温轧制有以下两种方式：

① 在保证终轧温度的前提下，尽量降低坯料的开轧温度。由于棒线连轧机轧制时，从开轧到终轧，轧件温降很小，甚至会升温，故可以使坯料的开轧温度降低至接近终轧的温度范围，即可从常规轧制时的 1 050 ~ 1 100℃降低至 850 ~ 950℃，其主要目的是节能，约可节能 20%左右。一般来说，轧件的终轧温度相应于轧件常化（也称为正火）温度，故这种低温轧制亦称为常化轧制或正火轧制。

② 在降低开轧温度的同时，还将终轧温度降至钢的再结晶温度（700 ~ 800℃）以下。此时，轧件不发生再结晶，而在轧件轧制延伸时，晶粒变形产生细化，可获得更细化、更均匀的微观组织。这种低温轧制，除节能外，还可明显地提高产品的机械性能，好像轧件经过某种热处理似的，故也称为机械热处理轧制，简称热机轧制。表 4.2-11 列出了某些钢种在低温轧制时采用的温度范围。

表 4.2-11 某些钢种在低温轧制时采用的温度范围

钢种	常化轧制范围/℃	热机轧制温度范围/℃
低碳钢	800 ~ 920	800 ~ 850
中碳钢	860 ~ 900	800 ~ 850
高碳钢	850 ~ 900	750 ~ 800
齿轮钢	850 ~ 900	750 ~ 850
淬、回火低合金钢	850 ~ 900	780 ~ 850
弹簧钢	850 ~ 900	750 ~ 800
冷镦钢	850 ~ 900	780 ~ 800
轴承钢	850 ~ 900	—
微合金钢	850 ~ 900	750 ~ 800

3）无孔型轧制（平辊轧制）。无孔型轧制是指在无轧槽的平辊上轧制高宽比较大的钢坯和棒材的轧制方法，也称为平辊轧制或无槽轧制。无孔型轧制一般用于粗轧和中轧道次，而在精轧道次仍采用常规的孔型轧制。无孔型轧制与常规的孔型轧制示意图如图 4.2-31 所示。

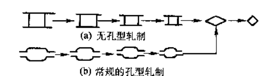


图 4.2-31 无孔型轧制与常规的孔型轧制示意图

无孔型轧制具有以下主要优点：

① 使轧制力降低。这是因为无孔型轧制的轧辊直径要比孔型轧制的轧辊直径小，其差值为孔型轧辊轧槽深度的两倍，且没有轧槽侧壁对轧件的作用和轧槽周边辊径差对轧件引起的摩擦力，因而轧制力比孔型轧制时降低 5% ~ 10%，减少了轧制能耗。

② 提高了轧辊使用寿命。无孔型轧制时，轧件断面上无速度差，轧辊磨损均匀，轧辊修复量减少，提高了轧辊使用寿命。而且，由于轧辊没有轧槽。轧辊辊身长度可充分利用，其工作表面的利用率可提高 20% ~ 30%。

③ 产品质量好。无孔型轧制可避免孔型轧制时轧辊与导卫装置错位、孔型的过充满、辊错、轧偏等引起的成品质量缺陷。而且，没有孔型轧制时可使金属产生横向流动，能使轧件表面发纹和裂纹等缺陷减少。

④ 成材率高。由于无孔型轧制时导向卫板简单，轧件因卡钢和跑套而轧废的数量减少。而且，轧制时轧件变形均匀，减少了轧件头部扭、歪等轧制事故，并使轧件头、尾的鱼尾和燕尾长度减小，这就减小了轧件切头和切尾的损失。所以其成材率可提高 0.4% ~ 1.0%。

⑤ 轧机作业率高。这是由于无孔型轧制时可以减少轧辊换辊次数，轧机调整也简单，这就减少了轧机停机时间，因而提高了轧机作业率。

综上所述，采用无孔型轧制具有较大的经济效益，特别是对于小批量、多品种生产的轧机，品种规格多的合金钢厂更能取得较好的经济效益。

但是，无孔型轧制必须使轧件轧制稳定，轧件不发生翻倒或扭转。并要解决轧件在轧制过程中，由于没有孔型侧壁的夹持作用，而使轧件产生的脱方和轧件角部出现尖角问题。因此，要准确确定轧件的断面形状、尺寸及变形参数。而且，由于入口方向的导板对轧件进入轧辊和轧制稳定性起有决定性作用，故要合理地确定入口导板与轧件之间的的间隙值，使其能扶持轧件，避免轧件歪斜。

2 小型型钢和棒材连轧生产

2.1 小型型钢和棒材连轧生产的主要特点及其工艺过程

由于机械和电气控制技术的进步，孔型设计的改进，特别是连铸技术的进步，带动了小型型钢生产技术的发展。现代小型型钢和棒材连轧生产线的主要特点是：①直接以连铸坯为原料，坯料规格现在大多采用 150 mm × 150 mm ~ 170 mm × 170 mm，坯重达到 2.5 t 以上。②一座步进式加热护或推钢式加热炉与一套轧机相配。③轧线主轧机平立交替布置，全线无扭转轧制。或者粗中轧机组全平布置，精轧机组平立布置；根据生产工艺需要，还可以将其中的一架或几架轧机作平立可转换布置。④一般在轧线上放置两台切头飞剪，一台切倍尺飞剪。⑤各架轧机单独传动，粗中轧机采用微张力轧制，精轧机组采用无张力轧制。⑥根据生产工艺的要求，轧线可设置完备的用于低温轧制和控轧控冷的温控设备。⑦为提高设备的利用率，除少数合金钢小型轧机建立复合生产线外，一般线材和小型车间单独建立。⑧冷床采用高效率的单面步进式冷床。⑨为了节省能源，连铸坯直接热装工艺得到应用。

以某厂小型型钢和棒材连轧生产线为例，其车间工艺参数如下：①产品规格为 ϕ10 ~ 40 mm 圆钢；ϕ10 ~ 40 mm 螺纹钢（ϕ10 mm 三切分，ϕ12 mm、ϕ13 mm、ϕ14 mm 二切分）可生产 36 mm × 36 mm × 3 mm ~ 70 mm × 70 mm × 5 mm 角钢，50 mm × 37 mm ~ 80 mm × 43 mm 槽钢；40 mm × 6 mm ~ 90 mm × 10 mm 扁钢。②产量为 50 万 t/a。③坯料规格为 120 mm × 120 mm × 1 000 mm，150 mm × 150 mm × 1 000 mm。④最高轧

制速度为 18 m/s。⑤生产钢种为碳钢和低合金钢。整条生产线由6架悬臂式轧机，12架短应力线轧机，共18架轧机组成。平立交替布置。

车间工艺流程图如下：连铸坯→上料→辊道运输→称重→测长（不合格坯剔除）→加热炉加热→粗轧机组→飞剪切头（事故碎断）→中轧机组→飞剪切头（事故碎断）→精轧机组→水冷处理→步进式冷床→精整（包括定尺冷剪，短尺收集，计数，打捆和收集）。

2.2 小型型钢和棒材连轧机的组成、类型及主要设备

（1）小型型钢和棒材连轧机的组成及类型

随着小型型钢和棒材生产工艺的进步和发展，机组的组成和类型也发生了很大的变化。过去那种横列式轧机逐渐被淘汰，其他如布棋式。串列式，跟踪式小型轧机等已很难见到。半连续式和连续式轧机发展迅速。连续式轧机是当今世界上最为流行，使用最多的一种小型轧机。

小型轧机一般由18～24架轧机组成，对于不同的坯料规格和成品尺寸所需要的机架数量有所不同。机架的多少按一个机架轧制一个道次的原则确定。机组的布置多为平立交替布置，但有的机组也采用全平式布置。全平布置方式对节省投资有利。当今流行有四种不同生产和设备布置特点的小型轧机：①通用的高速轧制的钢筋轧机。②切分轧制的高产量的钢筋轧机。③生产小型到中型型钢，扁钢，工字钢和棒材，包括大棒材的多种棒材轧机。④生产圆钢、扁钢和大盘卷的优质钢和特殊钢棒材轧机。

（2）小型型钢和棒材连轧机的主要设备

国内近几年来新建的小型型钢和棒材连轧机中，轧机主要有两大类型：一、二辊闭口式轧机；二、二辊短应力线轧机。国外引进的设备中以短应力线轧机为主。下面以北京钢铁设计研究总院设计的几种型式的轧机为例，分别介绍轧机的性能参数及结构特点。

1）二辊闭口式水平轧机。随着国际间技术交流的日益广泛，有力地促进了国内轧钢设备的进步和发展，在小型型钢和棒材轧机的设计上，国内的设计水平与引进设备相比差距越来越小。表4.2-12所列为采用四列圆柱滚子轴承的二辊闭口式轧机的性能参数。表4.2-13所列为采用四列圆锥滚子轴承的二辊闭口式轧机的性能参数。

表 4.2-12 采用四列圆柱滚子轴承的二辊闭口式轧机性能表

轧机名称	轧辊直径/mm	辊身长/mm	轧制力/kN	轧制力矩/kN·m	电动机功率/kW
ϕ550 水平轧机	610～520	800	2 400	230	500
ϕ550 立式轧机	610～520	800	2 000	190	500
ϕ520 水平轧机	560～480	600	2 100	210	650
ϕ520 立式轧机	610～520	600	1 900	150	650
ϕ450 水平轧机	495～420	700	1 500	120	650
ϕ450 立式轧机	495～420	700	1 200	110	650
ϕ420 水平轧机	450～400	650	1 000	70	650
ϕ420 立式轧机	450～400	650	900	60	650
ϕ350 水平轧机	380～330	650	700	40	650
ϕ350 立式轧机	380～330	650	600	35	650

表 4.2-13 采用四列圆锥滚子轴承的二辊闭口轧机性能表

轧机名称	轧辊直径/mm	辊身长/mm	轧制力/kN	轧制力矩/kN·m	电动机功率/kW
ϕ550 水平轧机	580～495	700	2 100	220	320
ϕ550 立式轧机	580～495	700	1 700	190	320
ϕ450 水平轧机	475～405	680	1 200	100	400
ϕ450 立式轧机	475～405	680	1 100	80	400
ϕ400 水平轧机	430～380	650	700	45	400
ϕ400 立式轧机	430～380	650	600	35	400

该轧机主要用于小型轧机的粗、中轧区。如图4.2-32所示为 ϕ550 水平轧机机座图。轧机是由辊系、机架牌坊、压下装置、轴向调整装置、换辊装置等组成。

该轧机机座具有以下特点：

① 辊系有两种形式，一种采用四列圆锥滚子轴承，另一种采用四列圆柱滚子轴承。采用四列圆锥滚子轴承的辊系结构，圆锥滚子轴承除承受轧制力外，还能承受轴向力，辊系结构较简单，换辊较方便。但轴承的承载能力比四列圆柱滚子轴承要小。轴承的密封采用迷宫加双密封圈的形式，能有效防止轧机冷却水及氧化皮等脏物进入轴承，延长轴承的使用寿命。轴承的润滑采用手动干油润滑。采用四列圆柱滚子轴承的辊系结构，圆柱滚子轴承只承受轧制力，不能承受轴向力。因此需要增加止推轴承来承受轴向力。止推轴承可以采用角接触球轴承，四点接触球轴承，双向推力圆锥滚子轴承或双列圆锥滚子轴承，这种辊系结构的主要优点在于提高轴承的承载能力。

② 机架牌坊采用厚钢板切割而成，两片牌坊采用横梁连接在一起。连接有两种形式，一种是牌坊与横梁之间采用螺栓连接，销子定位。另一种是采用焊接方式，将机架焊接成一个整体。无论那种形式都要求牌坊窗口进行整体加工以保证机架的整体加工要精度。

③ 压下装置采用内藏式，位于机架窗口内。改变了传统轧机压下螺母装置在牌坊上横梁内的结构，由于牌坊上横梁内不再需要开孔，使得牌坊由铸件改为钢板切割成形成为可能。同时消除了牌坊上横架中应力集中问题，使牌坊的各部分断面积更趋于合理。

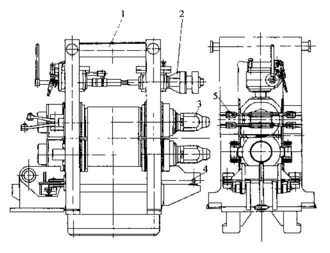


图 4.2-32 ϕ550 水平轧机机座图
1—机架牌坊；2—压下装置；3—辊系；
4—换辊装置；5—轴向调整装置

④ 轧辊平衡装置。现代小型轧机的轧辊平衡装置一般有两种形式：a）液压缸平衡。用液压平衡方式操作较方便，平衡力可以调整，设定液压系统的压力后，调整时无论辊缝如何变化，平衡力都是一个定值，缺点是增加机体上的连接管路，换辊时要先拆卸油管，增加工作量，而且传动侧的操作不方便，同时液压系统中油的泄漏会带来环境污染。b）弹性阻尼器平衡。这种平衡装置已经在小型轧机上得到了广泛应用。它的优点是：不需要外部管路，不存在因漏油污染环境问题，安装简单，不需要作任何调整即可投入工作。表 4.2-14 为弹性阻尼器的性能参数。设计时可选用标准参数，也可根据需要设计非标准弹性阻尼器。由于弹性阻尼器的反力是随着阻尼器的行程而变化的。压缩量越大，反力越大。因此设计压下装置时应考虑到弹性阻尼器的最大反力。

⑤ 轧机的换辊装置具有双重功能，既能实现快速换辊又能快速更换孔槽。换辊装置由换辊车架、换辊液压缸等组成，轧辊坐在车架上，将轧辊拉入机架后，轧辊轴承座即与车架分离，轧制时轧制力通过轴承直接传递到机架上。车架与牌坊用销或钩子联接在一起，需要更换孔槽时，液压缸推动机架横移将新孔槽对准轧线。换辊时将联接销或钩于打开，车架与牌坊脱离，液压缸推动车架将旧轧辊推出，将新轧辊拉人。采用快速换辊及快速换孔槽装置是现代小型型钢轧机的特点之一。

2）二辊闭口式立式轧机。立式轧机的辊系结构，轧机机座基本上与水平轧机相同。只是立式轧机的轧辊为垂直放置。因此立式轧机的传动装置有上传动与下传动之分。图 4.2-33 所示为 ϕ550 上传动立式轧机机列图（下传动立式轧机的传动装置则位于轧机下部）。

表 4.2-14 部分弹性阻尼器性能表

型号	最小反力/kN	行程 S/mm	总长 L/mm	最大反力/kN	D_1/mm	D_2/mm	H/mm
BTH－60A280	11 000	58	280	20 000	60	55	自定
BTH－60A350	11 500	70	350	23 500	60	55	自定
BTH－60A353	9 000	100	350	30 000	60	55	自定
BTH－65A280	15 000	50	280	27 300	65	60	自定
BTH－65B290	18 000	40	290	31 500	65	60	自定
BTH－60A351	23 000	50	315	41 000	65	60	自定
BTH－70A350	15 000	70	350	27 300	70	65	自定
BTH－70A365	20 000	70	365	36 000	70	65	自定
BTH－70A400	21 000	60	400	35 000	70	65	自定
BTH－70A490	30 000	40	490	52 000	70	65	自定
BTH－75A370	15 000	80	370	27 300	75	70	自定
BTH－75B370	23 000	60	370	41 000	75	70	自定
BTH－75A335	25 000	50	335	47 500	75	70	自定
BTH－75A385	30 000	50	385	52 000	75	70	自定
BTH－75A405	22 000	70	405	33 500	75	70	自定
BTH－75A415	22 000	60	415	31 500	75	70	自定
BTH－75A470	31 000	80	470	55 500	75	70	自定
BTH－80A345	18 000	70	345	31 500	80	75	自定
BTH－80A360	23 000	60	360	40 000	80	75	自定
BTH－85A390	18 000	90	390	31 500	85	80	自定
BTH－90A380	20 000	90	380	36 000	90	85	自定
BTH－90B380	23 000	105	380	47 500	90	85	自定
BTH－90A360	25 000	70	360	47 500	90	85	自定

续表 4.2-14

型号	最小反力/kN	行程 S/mm	总长 L/mm	最大反力/kN	D_1/mm	D_2/mm	H/mm
BTH－90A370	28 000	90	370	54 500	90	85	自定
BTH－90A450	31 000	80	450	44 000	90	85	自定
阻尼器简图							

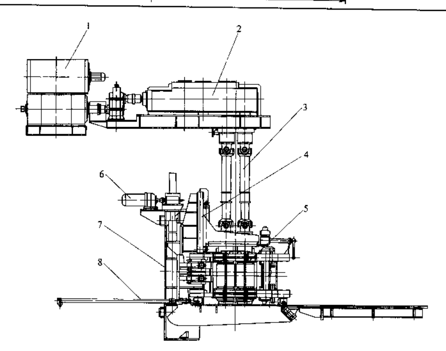


图 4.2-33　ϕ550 上传动立式轧机机列图

1—主电动机；2—减速器；3—万向接轴；4—接轴托架；5—轧机机座；6—轧机升降装置；7—轧机底座；8—换辊装置

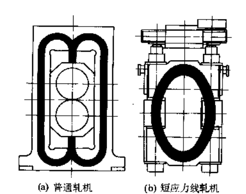
传动方式的选择取决于整个工厂设计的原则，当轧制线标高在＋800 mm 左右时，采用上传动形式较好，传动位置位于机架上部，安装检修均较方便。如采用下传动则要加大设备基础的深度，增加建设投资，同时由于传动装置位于轧机下面，工作环境恶劣，易受轧辊冷却水及氧化铁皮的浸蚀，影响使用寿命。当作业线为高架式时，轧制线标高为＋5 800 mm 左右，采用上传动还是采用下传动要综合考虑。采用下传动可降低车间天车轨面标高，从而降低厂房高度，节省基建投资，但设备维修不方便。有时加热炉与轧机在同一跨厂房内，且其顶面标高高于轧机最高处的标高，厂房高度必须满足最高标高要求。在这种情况下还是采用上传动较适合。

图 4.2-33 所示立式轧机具有以下特点：

① 轧机升降装置，通常设计为挂钩式。立式机架挂在升降架上，升降架上端挂钩处有一液压缸驱动的锁紧销将机架压住，防止脱钩。升降架由齿轮电动机通过丝杆升降机带动上下运动。升降架沿两侧导轨滑动，导向性能较好。轧机工作时，机架锁紧缸将机架锁紧在立式轧机底座上。换轧辊或换孔槽时，锁紧装置打开，升降架带动机架升降，实现快速换孔槽和快速换辊动作。机架下降到换辊轨道上后，换辊液压缸将机架推出至换辊位置，用起重机从机架上方将旧辊吊走，将新辊吊入。

② 接轴托架。立式轧机的接轴托架不同于水平轧机，托架布置在机架上方，托架形式之一为钳口式，在机架的左右各有一个钳口，通过液压缸带动开合。轧机工作时，钳口打开。换辊时，首先将机架提升至一定高度，钳口合拢，抱住接轴轴套，然后机架下降，轧辊轴头与轴套自动分离。立式轧机的接轴轴套端部不需要卡环装置，接轴的自重向下，运转过程中轴套与轴头之间不会产生轴向位移。

3）短应力线轧机。根据胡克定律，受力零件的弹性变形量与其应力回线长度成正比，轧机机座中承受轧制力的零件的长度和就是该轧机应力线长度。应力线的长度直接影响轧机的刚度。提高机座刚度的途径之一就是尽可能地缩短其应力线的长度。图 4.2-34a 所示为普通轧机的应力回线。显



(a) 普通轧机　　(b) 短应力线轧机

图 4.2-34　普通轧机与短应力线轧机的应力回线

然对辊径相同的轧机来讲，图 4.2-34b 的应力回线较短，刚性较高，短应力线轧机因此而得名。

短应力线轧机除应力线短，刚度较大，轧机弹性变形量较小外，与相同规格的轧机相比较，短应力线轧机的质量也较轻，整机外形尺寸较小，机架间距小，因此在作业线长度和厂房高度上都具有节省投资的潜力。但因为短应力线轧机为整机架更换方式，除在线机架外，还需要有备用机架，加上轧机的制造精度要求较高，整体投资与二辊闭口式轧机大致相同。表 4.2-15 所列为新一代短应力线轧机的性能参数。

表 4.2-15　新一代短应力线轧机性能表

轧机名称	轧辊直径 /mm	辊身长 /mm	轧制力 /kN	电动机功率 /kW
ZJD750×760－Ⅲ	800～720	760	4 400	
	780～680	760	4 400	
ZJD650×750－Ⅲ	700～630	750	3 200	550
ZJD550×760－Ⅲ	600～520	760	2 800	550
ZJD450×680－Ⅲ	475～405	680	1 800	650
ZJD350×500－Ⅲ	380～320	650	1 500	800
ZJD300×500－Ⅲ	340～280	500	1040	

该轧机主要用于小型轧机的粗，中、精轧区。短应力线轧机也有水平轧机和立式轧机之分。图 4.2-35 为 $\phi750$ 短应力线水平轧机机座图。

该轧机具有以下特点：

① 轧机的拉杆装置。短应力线轧机因为没有牌坊，其轧制力由四根拉杆承受。在拉杆的中部装有中间支承块，起支承整个轧机本体的作用。拉杆穿过上下轴承座，拉杆上装有调整螺母、球面垫、定位套等。拉杆上下分别为左右旋梯形螺纹。当拉杆转动时，上下轴承座作相对运动，实现轧辊中心距同步相对调整，轧制线保持不变。球面垫具有自动调心作用，保证轧辊轴承受力良好。

② 辊缝调整装置。短应力线轧机的辊缝调整装置不同于闭口式轧机的压下装置。它是由一套传动装置带动四根拉杆旋转来实现辊缝的调整。由液压马达传动两对齿轮，齿轮装在蜗杆轴上，通过蜗杆驱动蜗轮，蜗轮装在拉杆上端，蜗轮旋转带动拉杆旋转，在其中一个拉杆的顶部装有编码器，用于辊缝的自动调整。在传动装置的中间轴上装有手动离合器。液压马达布置在传动侧，在操作侧设有手柄，打开离合器可进行单侧调整。不同规格的轧机拉杆中心距也不同，因此辊缝调整的结构形式也有所不同。设计中采用什么样的布置方式完全根据具体情况确定。

③ 轧辊轴向调整装置。由于短应力线轧辊轴承座与拉杆连接在一起，不能进行轴向移动，因此轧辊的轴向调整必须采用一套专门机构来完成。

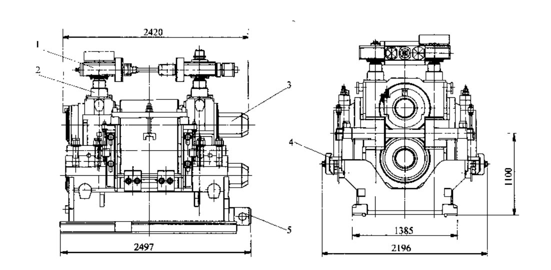


图 4.2-35　$\phi750$ 短应力线轧机座图

1—轧辊调整装置；2—拉杆装置；3—辊系；4—导卫架；5—底座

4）平立转换轧机（H/V 轧机）。在型钢生产和进行切分轧制中常常需要将某些机架进行平立转换。当生产型钢产品时可转换轧机作为立式轧机使用，保证产品质量；当采用切分工艺生产钢筋时可转换轧机作为水平轧机使用，确保切分工艺稳定。图 4.2-36 所示为可转换轧机的一种结构形式。

将短应力线轧机机座安装在一台转换架上，通过液压缸将机座转换成水平或立式布置。转换架的端部为联合齿轮箱，转换架的底部为锥齿轮传动装置。翻转液压缸布置在转换架的下面，转接架与底座之间为绞接连接，转换架以绞接点为圆心进行翻转。当轧机需要进行水平布置时，转换架成水平状态，传动装置中的离合器与联合齿轮箱的输入轴连接来传动轧辊。当轧机需要立式布置时，转换架成立式状态，联合齿轮箱此时位于转换架的最高位置，不可能再直接与离合器连接，而是通过锥齿轮装置与离合器连接。此外，还一种固定机架为圆弧形的平立转换轧机。两侧机架上均有圆弧导槽，转换架上的四个滚轮装在圆弧导槽内。通过液压缸传动。转换架可绕着圆弧的圆心顺着导槽转动，轧机机座固定在转换架上。

5）其他几种小型轧机。在小型轧机中除二辊闭口式轧机、短应力线轧机外还有一些其他类型的轧机，如二辊开口式轧机，预应力轧机，悬臂式轧机，紧凑式轧机，三辊行星轧机，Y 型轧机（Kock's 轧机）等。从国外引进的设备中，有摩根（MORGAN）型、施罗曼－西马克（SMS）型，达涅利（DINIELI）型、波米尼（POMINI）型等几种主要机型。



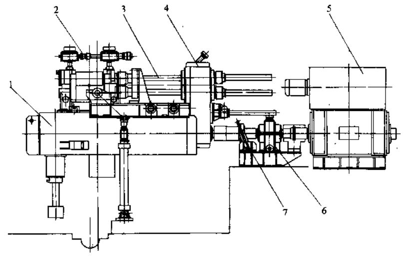


图4.2-36 平立转换轧机

1—转换架；2—轧机机座；3—传动轴；4—联合齿轮箱；5—主电动机；6—齿轮箱；7—离合器

3 高速线材生产

3.1 高速线材生产发展概况

(1) 国外发展概况

1966年第一台全新结构的摩根（MORGAN）45°高速无扭线材精轧机问世后，引起了线材生产领域的革命性变化。线材轧制速度突破了以往的极限。由于这种高速线材精轧机比其他类型的线材精轧机具有巨大的优越性，所以在它问世以后立即在全世界得到了广泛的推广。高线轧机以其成功的生产技术和良好的经济效益，吸引许多的设备制速厂商纷纷加入到高线生产工艺设备的研究和开发行列中，相继开发出了不同类型的高速线材轧机。在此后30多年时间里，此类高速线材轧机技术得到迅速发展，装备技术水平突飞猛进。以摩根（MORGAN）高线轧机为例，经过几十年不断地改进和更新换代，轧机的保证速度从最初的43 m/s不断提高，目前已突破了100 m/s大关，达到120 m/s。

由于轧制速度的提高，坯料断面得以增加，盘卷卷重也逐渐加大。由早期的0.7 t提高到了现在的2~2.5 t，随着无头轧制技术的应用甚至达到3.1 t。

随着市场对线材产品要求的日益提高，高线生产工艺、生产装备也在不断改进。进入20世纪90年代中期，终于引发了新一轮的技术进步，高线生产工艺从概念上有了重大突破，如减定径、无头轧制等一批新工艺、新设备的出现，不仅使高线生产技术跃上了新台阶，也使此前存在于生产中的一些难题迎刃而解。

目前世界上已建设高速线材轧机生产线约460余条，其中摩根（MORGAN）及按摩根（MORGAN）图样制造的生产线约300条，达涅利（DANIELI）公司制造了约100条，戴维（DAVID）公司制造了30条，德马克（DEMAG）公司制造了约35条。在工业发达国家，90%以上的线材均由高速线材轧机生产。线材生产发展的总趋势仍是提高轧速、增加盘重、提高精度及扩大规格范围。坯料断面尺寸扩大到150 mm×150 mm~160 mm×160 mm，个别使用180 mm×180 mm。

近年，世界线材生产总量有所增加，这主要是由于中国等一些发展中国家产量迅速增加。反观发达国家的线材产量却在减少，20世纪80年代以来，发达国家除美国新建6套线材或棒线材轧机外，已极少新建线材轧机，大多是进行技术改速。

(2) 国内发展概况

我国在20世纪80年代以前，都用一般的横列式轧机和复二重轧机生产线材。20世纪70年代中后期我国开始自行研制多机架悬臂无扭线材精轧机。80年代初，由北京钢铁设计研究总院设计的我国第一台国产高速线材无扭精轧机组开始投产，我国开始有了真正意义上的高速线材生产线。与此同时，我国还引进了国外这类高速线材轧机，主要有摩根（MORGAN）、施罗曼-西马克（SMS）、阿希洛（ASHLOW）、德马克（DEMAG）、达涅利（DANIELI）和波米尼（POMINI）等公司的产品，引进的轧机技术水平也随着国外轧机不断的改进而不断的提高。

自我国第一台国产高速线材无扭精轧机组开始投产以来，以北京钢铁设计研究总院为代表的国内公司不断吸收国外先进经验，改进完善自己的产品，技术水平日益提高，陆续推出保证轧制速度为55 m/s、65 m/s、80 m/s、90 m/s等高速线材轧机装备，高速线材生产工艺也日臻完善。目前，由北京钢铁设计研究总院最新开发、哈尔滨飞机制造公司定点生产的保证轧制速度90 m/s的顶交45°重载精轧机机型，已在国内广泛使用，建成投产6套，在建10余套，目前保证速度已提高到95~100 m/s，处于国内最高水平，达到当前国际先进水平。

20世纪80年代以来，随着国民经济的持续稳定发展，我国对线材的消费需求量不断增加，促使我国线材生产工艺有了长足的进步，线材产量也不断提高。到目前为止，据不完全统计，我国已投产和将投产的高速线材生产线共有75条，其中轧制速度大于70 m/s的有56条，在这56条中轧制速度大于100 m/s的有22条，在这22条中装备有减径、定径机组的有6条，轧制速度都在112 m/s以上。

上述75条高速线材轧机生产线的设计产量可达2 400万t/a，约占我国线材生产总量的60%。与其他国家比较，我们不但已成为线材生产的大国，而且也是线材轧机装备上的强国。

尽管我国已成为线材生产大国，但与先进国家相比仍有比较大的差距，主要表现在高线比低、硬线及合金钢等高附加值线材比低、控冷线材比低、总体质量水平低等。因此，线材生产也面临着结构调整的繁重任务，必须优化工艺结构、产品结构，加紧开发研制新装备，才能增强市场竞争力。

3.2 高速线材生产工艺

当代线材生产的重要特点是轧制的高速度、产品的高质量、设备的高效率。目前国内的高速线材车间一般都采用单线全速续无扭轧制工艺，车间采用高架式布置方式。这已成为国内高速线材车间的标准模式。国内也有部分生产厂为追求产量采用双线布置。



（1）高速线材生产工艺流程

目前国内高速线材车间一般采用 150～170 mm 的连铸方坯为原料，产品规格为 ϕ5.5～ϕ20 mm 的圆钢或 6～16 mm 的螺纹钢筋，采用减定径技术的生产线产品规格可下延至 ϕ5 mm。轧制的钢种包括：碳素结构钢、优质碳素结构钢、低合金钢、焊条钢、冷镦钢、弹簧钢、轴承钢等。盘卷质量一般为 1.5～2.5 t。车间年产量一般在 40 万 t 以上，有的车间采用双线布置，年产量可达 100 万 t。

现以目前国内流行的一条单线全连续、具有减定径工艺的生产线为例对其工艺流程加以介绍。

该车间年产量为 50 万 t，坯料为 1 600×160 mm×12 000 mm 的连铸坯，产品规格为 ϕ5.5～ϕ20 mm 圆钢，品种为碳素结构钢、优质中碳结构钢、优质高碳结构钢、冷镦钢、焊条钢、弹簧钢。整条生产线由 30 架轧机组成：粗、中轧及预精轧机组各为六架平/立交替布置，单独传动。立辊轧机均为上传动。精轧机组为 8 架 V 形重型 45°无扭精轧机，最终为 4 架减定径机组。车间为高架式布置。

该车间的上料系统考虑了坯料的热装热送，加热炉采用步进梁式加热炉，侧进侧出，炉内辊道出钢。在预精轧机组与精轧机组之间、精轧机组与减径、定径机组之间及减径、定径机组后分别设有水冷装置，对轧件进行冷却，实现低温轧制和控制终轧温度。控制冷却方式为延迟型散卷冷却辊道式运输。采用双臂回转芯棒式集卷系统，盘卷运输和收集采用 P&F 链式悬挂运输系统，盘卷井压紧打捆、称重后，运到卸卷机台架上，由起重机运走。

车间工艺流程如下：连铸坯→上料→辊道运输→ 称重、测长（不合格坯剔除）→ 加热炉加热→高压水除鳞→夹送辊夹送→粗轧机组→飞剪切头（事故碎断）→中轧机组→飞剪切头（事故碎断）→预精轧机组轧制→中间水冷段水冷→飞剪切头（事纹碎断）→精轧机组轧制→水冷段控制水冷→减径定径机组轧制→水冷段控制水冷→ 测径仪→夹送辊夹送→ 吐丝机布线圈→ 散卷运送控制风冷 →集卷→翻卷、挂卷→积放悬挂式冷却运输线→检查修剪取样→压紧打捆→称重挂标牌→卸卷→入库→发货。

（2）当代高速线材生产工艺新技术

由于市场对线材产品要求的日益提高，使得高线生产工艺、生产装备也在不断改进。随着新的轧制设备的开发、研制成功，并不断完善，线材生产工艺的许多新技术也应运而生，并日趋完善。

1）生产规格范围扩大，轧制品种增加。20 世纪 80 年代初期线材轧机生产的规格还仅局限在 ϕ5.5～ϕ13.5 mm 的圆钢，由于生产工艺的完善，新的轧制设备的研制成功、性能提高，目前不但轧制范围扩大至 ϕ5.5～ϕ25 mm 的圆钢，而且还增加了 6～16 mm 的螺纹钢筋。产品质量明显提高，产品的尺寸精度可达：直径 ±0.1 mm、椭圆度 0.1 mm；金相组织可达超细晶粒 5～10 μm，整盘线材的力学性能差可控制在 20 MPa 以内。

2）低温轧制和控制冷却。低温轧制和控制冷却技术在现代线材生产中有很大发展前景。其优越性是可以改善金相组织和机械性能，并可省略或简化后步热处理工序。

现代高速线材轧机已经可以实现全轧制过程的温度控制。由于采用低温轧制，开轧温度从 1 000～1 100℃降低至 850～950℃，故可降低燃料消耗，减少脱碳、烧损，改善轧件表面质量。现在新设计的轧机可以满足 950～1 000℃（特殊钢 1 030℃）较低开轧温度的要求。此外，在精轧机前或减定径机前设置水冷箱和较长的均温段，将轧件冷却至 700～750℃，并使其表面和内部温度均匀后，进行最后阶段的低温轧制。

温控轧制（即热机轧制）比常化轧制在更低的温度下完成精轧，即在进行最后 2 道次或 4 道次轧制时，将轧件温度控制在 A_{c3} ±30℃的温度范围内，并对其施以适当的变形量，完成变形和热处理的工艺过程。在低温下变形不发生完全再结晶，获得细化晶粒。多年的研究和实践表明：只有在最后 2 道次或 4 道次采用低温轧制，才能产生均匀细化晶粒的效果。在更多道次中采用大变形量的低温轧制，会导致晶粒尺寸的不均匀。

低温轧制使产品具有更高的机械性能，可改进表面质量，更利于冷加工，并便于热处理，是提高产品质量非常有效的技术。经低温轧制的产品具有高的强度和韧性，无论是单纯的冷加工还是单纯的热处理，都无法达到这两者都具备的性能。低温轧制可适用的钢种很广，从低碳钢、中碳钢，到调质钢、弹簧钢及轴承钢，都可达到预期的技术性能。

控制冷却包括水冷和风冷两部分。目前水冷普遍采用温度自动闭环控制。散卷冷却线采用较多的是延迟型辊式运输机，它可根据不同钢种和用途，采用不同的冷却制度，冷却速度范围是 0.5～17℃/s，不但可处理高中碳钢，还可处理低碳钢、焊条钢、冷镦钢和部分合金钢。由于采用辊式运输机，并在一定的区段设置了“台阶”，使线材搭接形成的“热点”问题得到较好解决。此外，还采用了沿宽度分配风量的装置，用以提高线材性能的均匀性。控制冷却处理后，高碳钢可省略铅浴淬火，冷镦钢及低合金钢也可省略软化退火。

随着被处理线材直径的加大，要求相应增加风冷能力，因而出现了大风量散卷冷却运输机，最大风冷速率可达 20～30℃/s。对大规格线材则增加水雾冷却。

3）螺纹钢线材的热芯回火工艺。当代高速线材轧机都增加了螺纹（或其他型式）钢筋的生产，规格为 ϕ6～16 mm。这不单是改变产品外观，而且需要具有一整套工艺手段的轧制技术，其中包括在线热处理——芯热回火工艺。为保证这一工艺的实施，在精轧机组后增加了一段水冷箱（由 4 个增加到 5 个），来加大冷却幅度，使轧出的螺纹钢表面迅速冷却到 250℃以下，然后在散卷冷却线上进行自回火处理。

采用该工艺生产出的产品与传统工艺生产的产品相比，在化学成份相同的条件下，钢材的屈服强度提高了约 20%；或在达到相同强度等级条件下，可降低钢的合金成分，进而使生产成本大幅度降低。

4）减定径技术。减径、定径机组是汽车制造和其他制造业蓬勃发展的必然结果。摩根（MORGAN）公司和达涅利（DANIELI）公司先后推出了各自的减径定径机，因面产生了 8 架精轧机加 4 架减径定径机或 8 架精轧机加 2 架减径机的新型线材精轧机组（以下简称 8+4 或 8+2）。虽然都是将传统的 10 架高速无扭精轧机分为 8+4 或 8+2 布置，但两者研制的出发点不同。摩根（MORGAN）公司是为提高线材的精度和简化孔型系统，达涅利（DANIELI）公司是为了解决轧制合金钢的温升问题和简化精轧机的孔型系统。

与传统的 10 机架无扭精轧机组相比较，8+4 线材精轧机组一个大的改进是：ϕ5.5～20 mm 全部规格的产品均由最后 4 架轧出，8 架精轧机为单一孔型，轧件所有的尺寸变化均在最后 4 个机架进行。这就要求其 4 个机架间的速比可以改变。

摩根（MORGAN）公司和达涅利（DANIELI）公司机型的区别就在于改变速比的方式不同。摩根（MORGAN）公司的 4 机架减径定径机由 1 台电动机驱动，机架间的速度配置由一组变速齿轮精分配，共有 192 种速比，速比的设定和调整由计算机控制液压缸进行。达涅利（DANIELI）公司的 4 机架减径定径机分 2 组，每 2 架由 1 台交变频的电机传动，在 1～2 机架和 3～4 机架间的速度匹配由齿轮箱实现，2～3 机架间的速度配置由电机速度调节。



这二种机型的传动形式各有优缺点，单电动机传动的优点是不管是轧件进入机组的瞬间，即机组受到阶跃负荷时，还是在轧制进行的中间，稳态轧制时，各机架间的速度关系均不会变，这样可减少轧件头尾超差。面双电动机传动的定径机组，当轧件进入机组的瞬间，由于二个电动机受阶跃负荷的前后时间差别、负荷大小的差别、机械转动惯量的差别，必然会使前后二机组之间的速度配合关系有所变动，这就会引起轧件头、尾与中部产生尺寸误差。但单电机传动，使传动部分机构复杂，设备重量增大，机械部分造价高，维修工作量也加大。而双电机传动，可简化传动结构，减轻设备重量，设备维修工作量小。

减径、定径机组具有如下特点：

① 轧机有足够的强度与刚度。能够实现低温轧制，改善产品最终的机械性能，提高产品的尺寸精度。

② 机组各机架间速比可调。能够实现 ϕ5 mm ~ 20 mm 各种产品规格的自由轧制。简化孔型系统，减少轧辊和导卫数量，减少更换孔型的时间，提高轧机作业率。

③ 机组换辊时间短，作业率高。一般都采用换辊小车，二套减径、定径机组交替更换，一套在生产，另一套在线外更换轧辊和导卫，所以停产换辊的时间实际上就是小车移出和移入的时间，快则只需 5 min。

④ 轧机线外调整，时间充裕，调整精度高，一般第一次试轧就能成功，减少试轧材料和时间。

另外，电气控制技术的进步也使得减定径技术的成功应用成为可能。

5）无头轧制。无头轧制是将刚出加热炉的钢坯的头部与前一根钢坯的尾部焊接起来进行轧制，以消除轧制间隙时间，从而提高轧机作业率，此外，还大大减少了咬入和切头次数，使事故率降低，成材率提高，轧制过程更为稳定。线材分卷是在集卷筒内进行，可根据用户要求选定卷重，而且在盘卷打捆前不需进行头尾线圈的剪切。无头轧制可使轧机的生产能力提高 12% ~ 15%，生产成本降低 2.5% ~ 3%。

目前世界上有两家公司可以提供无头轧制工艺和设备，一个是意大利达涅利（DANIELI）公司，其工艺称为无头焊接轧制（EWR）；一个是日本钢管公司（NKK），其工艺称为棒材无头轧制系统（EBROS）。我国的新疆八一钢厂、唐山钢厂、涟源钢厂均采用了无头焊接轧制（EWR）技术，邢台钢铁公司第二高线厂采用了棒材无头轧制系统（EBROS）。

无头轧制所用焊接装置适合于断面为 100 mm × 100 mm ~ 200 mm × 200 mm 碳钢和低合金钢的钢坯。焊接 130 mm × 130 mm 的方坯周期时间大约为 25 s（实际焊接时间仅为7 s）。经过对焊接部位和所轧产品的多次检验，证明产品中没有因焊接引起的内部和表面缺陷，在焊接部位上测得的屈服强度和抗张强度均不亚于母体，仅产生轻微的脱碳，并且是在成分允许波动的范围内。

6）以连铸坯为原料并采用热装工艺。目前国外高速线材轧机均采用连铸坯为原料，这与采用初轧坯相比，从炼钢到成材，工序能耗吨钢可降低 80 kg 标煤，得率提高 10%左右。

众所周知，采用热装工艺可使燃料消耗大大降低，加热质量提高，减少金属损耗，减少钢坯库面积。线材生产所用的坯料尺寸单一，各规格产量相近，因而热装条件较好。近年在国外有些厂采用了这项工艺，但并不十分广泛。我国近年十分重视坯料热装，目前张家港润忠高线就采用了热装。此外，正在建设的杭钢、安阳、萍乡等厂的高线车间在设计中均考虑了热装工艺。

7）在线测径和探伤。近年来，在新建的高线生产线上普遍采用了在线测径和探伤技术。即在精轧机后成定径机后设置了热态在线测径装置和涡流探伤仪，对线材从头到尾全长的尺寸精度和表面质量进行监测，以及时发现成品线材尺寸超差及由轧制工具所造成的缺陷。我国已有大连、张家港、湘钢、包钢、宝钢、杭钢等厂的高线轧机采用了测径仪，大连、宝钢、杭钢的生产线上还采用了涡流探伤仪。

3.3　高速线材轧机的组成、类型及主要设备

（1）高速线材轧机的组成及类型

随着高速线材生产工艺的进步和发展，机组的组成和类型也发生了很大的变化。过去那种横列式轧机、复二重式轧机逐渐被淘汰，半连续式和连续式轧机生产线发展迅速。全连续式生产线是当今世界上最为流行、应用最多的高速线材生产线。由于机械和电气控制技术的进步，特别是连铸技术的进步，高速线材生产发生了根本性的变革。现代高速线材轧机的主要特点是：①直接以 150 mm × 150 mm ~ 170 mm × 170 mm 的连铸坯为原料。②设备和布置都比以前大大简化，除合金钢线材生产外，一般高速线材车间加热炉不再需要复杂的坯料检查和修磨设备。③一座加热炉与一套轧机相配。④全线无扭转轧制，轧线主轧机中粗、中、预精轧机组采用平立交替布置方式；精轧机组一般采用 10 架集中传动的悬臂辊环式无扭精轧机组或 8 架集中传动的悬臂辊环式无扭精轧机组 + 4 架减径、定径机组。以 150 mm × 150 mm 断面的坯料为例：粗轧 6 架、中轧 6 架、预精轧 6 架、精轧 10 架的组合已成为普通钢高速线材生产线的标准布置形式。⑤采用新型轧机，如新型闭口式轧机、高刚度短应力线轧机、悬臂辊环式预精轧机组、顶交 45°重载精轧机组、减径、定径机组、新型卧式吐丝机等。⑥一般轧线上设置 3 台切头飞剪用于切头尾和事故碎断。⑦组、中、预精轧机组单独传动，精轧机组集中传动。⑧粗、中轧机组、精轧机组采用微张力轧制，预精轧机组采用无张力轧制。⑨轧线设备有完备的用于低温轧制和控轧控冷的温控设备。⑩配备完善的盘卷收集系统，如散卷冷却运输机、集卷站、P&F 运输链、压紧打捆机、称重台架、卸卷站等。

高速线材轧机一般由 26 ~ 30 架轧机组成，对于不同的坯料规格和成品尺寸所需要的机架数量有所不同。机架的多少按一个机架扎制一个道次的原则确定。粗、中轧机组、预精轧机组的布置多为平立交替布置，精轧机组多为顶交 45°布置。但也有的粗、中轧机组采用全平式布置。全平布置方式对节省投资有利。

近几年，我国一些线材生产企业为追求产量，成对原有的普通线材车间进行技术改造，陆续建成或在建一些双线高速线材生产车间。这些车间共同特点为：粗、中轧机组为两线共用，全水平布置；粗轧机组与中轧机组间为脱头辊道，粗轧机组采用单根轧制，中轧机组为双根同时轧制；预精轧机至集卷站为双线对称布置；产品一般为普碳钢或低合金钢，产量大都在 80 万 t/a 以上。

（2）高速线材轧机的主要设备

国内近几年来新建的高速线材生产线中，主要有以下几类设备组成：①粗、中轧机组，主要采用二辊闭口式轧机或二辊短应力线轧机。②悬臂辊环式预精轧机组。③45°无扭精轧机组。④减径、定径机组。⑤夹送辊及吐丝机。⑥飞剪机。最近从国外引进的设备当中大部分采用了减径、定径机组。

随着国际间技术交流的日益广泛，有力地促进了国内轧钢设备的进步和发展，在小型型钢和棒材轧机的设计上，国内的设计水平与引进设备相比较差距越来越小。目前，除减径、定径机组国内尚未开发研制成功外，其他轧制设备国内均可制造生产，并逐渐成为国内企业选用的主流产品。

下面以北京钢铁设计研究总院设计的几种型式的轧机为例，分别介绍轧机的性能参数及结构特点。

1）二辊闭口式轧机和二辊短应力线轧机。高速线材生产线立式轧机的粗、中轧机组与小型、棒材生产线的工作条件非常类似，轧机的形式及能力也很一致，通常采用相同的机型。因此，用于小型、棒材生产线的二辊闭口式轧机和二辊短应力线轧机也用于高速线材生产线的粗、中轧机组或预精轧机组的前2架。由于高速线材生产线立式轧机的的粗、中轧机组的孔型系统单一，换辊不很频繁，并且对轧件的精度要求不是很高，一般线材生产线采用二辊闭口式轧机，而合金钢或不锈钢高速线材、棒线材车间的预精轧机组（同时作为棒材精轧机组）则较多采用短应力线轧机。

这两种类型的轧机的设备及性能介绍参见2.2第（2）小节小型型钢和棒材连轧机的主要设备。

2）悬臂式预精轧机机组。悬臂式预精轧机组结构紧凑，质量轻，占地面积小，调整精度高且可靠，换辊方便。更重要的是由于机组实现了无张力轧制，提高了向精轧机输送的轧件精度，从而减少了精轧工艺的障碍，有利于提高线材成品精度，是线材生产厂预精轧机组优选的机型。

悬臂式预精轧机组主要由二架水平轧机、二架立式轧机、三个立活套以及安全罩等部分组成。此型预精轧机组简图如图4.2-37所示。

1 2 3 4 5

(a) 水平轧机断面图

5 4 3 1

(b) 立式轧机断面图

图4.2-37 预精轧机简图

1—电动机；2—减速器；3—传动箱；4—轧辊箱；5—辊环形轧辊



每架轧机机架由传动箱和轧辊箱组成。传动箱的作用是将电动机或减速器输出的力矩传递到轧辊轴上。水平传动箱有一对圆柱斜齿轮；立式传动箱增加一对螺旋锥齿轮，二架立式传动箱螺旋锥齿轮速比不同。轧辊箱采用法兰插入式安装，每个轧辊箱内有上、下两根轧辊轴，上、下两根轧辊轴之间不啮合，而是分别由传动箱中的一对圆柱斜齿轮传动。每根轧辊轴上装有一个悬臂的辊环形轧辊，轧辊轴由前、后油膜轴承支撑安装在偏心套内。偏心套由辊缝调节机构中的左、右丝杠和螺母带动转动，使上、下两根轧辊轴相对轧制中心线对称均匀地开启和闭合，从而实现辊缝调整。

悬臂式预精轧机机组的主要特点

① 传动箱和轧辊箱各自独立为一个部件，便于装拆。

② 辊缝调整采用偏心套式，这种调整机构的最大优点是保持轧制中心线不变。

③ 通过轧辊轴末端的止推轴承，有效解决轧辊轴轴向窜动问题，保证轧件的尺寸精度。

④ 水平机架和立式机架的轧辊箱结构和尺寸完全一样，轧辊箱的全部零件均可互换。

⑤ 采用专用工具装拆辊环，快速可靠。

⑥ 立式轧机传动系统中省去了减速机，而由安装在传动箱内的一对锥齿轮来传递动力和变速，机列设备质量轻、占地面积小。

预精轧机机组的设备性能

轧机型式：悬臂式轧机

机架数量：4 架

布置方式：平－立－平－立

轧辊直径：ϕ285 mm～ϕ255 mm

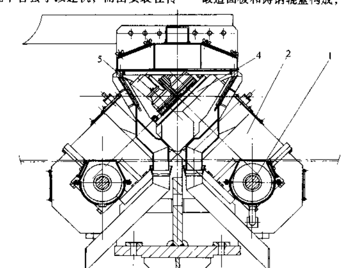
轧辊宽度：70 mm；95 mm

轧辊中心距：255～291 mm

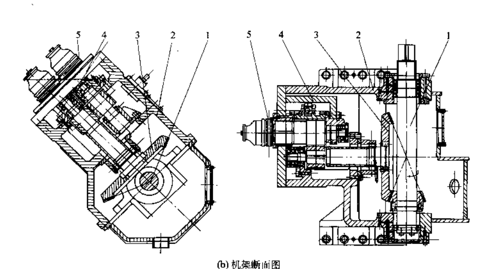
辊缝调整量：±18 mm

3）45°高速无扭精轧机组。该 45°高速无扭精轧机组为顶交重载机型，由五架 ϕ230 轧机和五架 ϕ170 轧机组成，最后两架 ϕ170 轧机为超高速机架，保证速度可达到 95 m/s。机组由一台交流电动机集中传动。由于机组采用顶交 45°布置，降低了长轴高度，既增加了机组的稳定性，又降低了设备质量，操作维护也更加方便。该精轧机组简图如图 4.2-38 所示。

轧机机架由锥齿轮箱与插入式结构的轧辊箱组成。锥齿轮箱内安装有锥齿轮副、圆柱同步齿轮副。轧辊箱由法兰式锻造面板和铸钢辊盒构成，中间的轧辊轴通过偏心套机构安



(a) 机组断面图



(b) 机架断面图

图 4.2-38　精轧机简图

1—传动长轴；2—锥齿轮箱；3—锥齿轮副；4—轧辊箱；5—辊环形轧辊

装于轧辊箱内，轧辊箱的辊盒插入锥齿轮箱的箱体内，通过法兰式锻造面板用螺栓与锥齿轮箱相联接。轧辊箱内有上、下两根轧辊轴，上、下两根轧辊轴之间不啮合，而是分别由传动箱中的一对圆柱斜齿轮传动。每根轧辊轴上装有一个悬臂的辊环形轧辊，轧辊轴由前、后油膜轴承支撑安装在偏心套内。偏心套由辊缝调节机构中的左、右丝杠和螺母带动转动，使上、下两根轧辊轴相对轧制中心线对称均匀地开启和闭合，从而实现辊缝调整。

① 精轧机组结构特点

a) 轧辊箱采用插入式结构，悬臂辊环，箱体内装有偏心套机构用来调整辊缝。

b) 轧辊箱与锥齿轮箱为螺栓直接连接，轧辊箱与锥齿轮箱靠两个定位销定位，相同规格的轧辊箱可以互换。

c) 轧辊侧油膜轴承处的轧辊轴设计成带锥度的结构，从而提高了轧辊轴的寿命。

d) 轧辊轴的轴向力是由一对止推滚珠轴承来承受，而这一对滚珠轴承安装在无轴向间隙的弹性垫片上，即保证了轧件的尺寸精度。

e) 辊缝的调节是旋转一根带左、右丝扣和螺母的丝杆，使两组偏心套相对旋转。

f) 辊环采用碳化钨硬质合金，用专用的液压换辊工具更换辊环，换辊快捷方便。

② 精轧机组的设备性能

轧机形式：悬臂辊环式轧机

机架数量：10 架（1～5 架为 $\phi230$ 轧机，6～10 架为 $\phi170$ 轧机）

（可根据轧制工艺要求来布置机架）

③ 布置方式：顶交 45°，10 机架集中传动

④ 辊环尺寸：$\phi230$ 轧机：$\phi228.3/\phi205\times72$ mm

$\phi170$ 轧机：$\phi170.66/\phi153\times57.35/70$ mm

⑤传动电动机：AC 同步变频电动机

功率：5 000～5 500 kW

转速：1 000～1 500 r/min

高速线材精轧机组是线材生产线上最完备的轧机，比以往任何轧机都更合理。无论是在生产率上、还是在产品质量上都能满足先进的工艺要求。适应线材品种、规格十分广泛，能生产各种高质量的线材。无扭精轧机生产的产品尺寸精度可达到 ±0.15 mm。

4 切分轧制技术

4.1 切分轧制技术的发展概况及其主要特点

切分轧制技术是轧钢生产的一种新技术。一般来说，切分轧制技术有三种方式。第一种方式是单纯地把一根轧件沿纵向切分成两根或两根以上的轧件，有的还将切分后的轧件分别进行成品轧材的轧制。第二种方式是将横断面不对称的轧材进行成对轧制以形成对称断面轧件，然后离线将其切分开。第三种方式是把一根轧件通过特殊的轧辊孔型轧成具有两个或两个以上形状相同的并联轧件，再通过切分装置或轧辊切分将并联的轧件沿纵向切分成两根或两根以上的轧件。切分后的轧件可作为中间坯料继续进行在线轧制同时轧出两根或两根以上的成品轧材，或者作为供其他轧机使用的坯料。

(1) 切分轧制技术发展概况

切分轧制技术已有 130 多年历史，早在 1868 年英国和美国就研究成功废旧钢轨的切分轧制，即将加热后的废旧钢轨在带有切分环的轧机上沿轨长方向切分成轨头、轨腰和轨底，或者从轨腰或轨头处将钢轨进行切分（见图 4.2-39），然后再分别将其轧制成其他成品轧材。图 4.2-40 为钢轨切分轧制轨头、轨腰和轨底时用的出口导板。1954 年我国鞍山钢铁公司金属制品厂在 $\phi250\times4$ 轧机上切分钢轨，分别将轨头轧成钢钎，轨底轧成锹板。

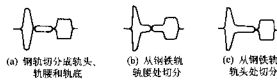


图 4.2-39 钢轨的切分轧制

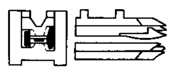


图 4.2-40 钢轨切分成轨头、轨腰和轨底时用的出口导板

此外，还有一些国家采用切分技术生产横断而不对称的异形轧材。例如，图 4.2-41 为成对轧制双球扁钢的孔型系统。由于球扁钢是横断面不对称的异形轧材，单个轧制较为困难，成材率低、产品质量差。如果将两个球扁钢并联成对轧制以形成对称断面轧件，就可使轧制过程稳定。由图 4.2-41 可见，在孔型设计时，采用切分轧制技术，经七个道次轧制后，在两个球扁钢断面间轧出厚度不大（1～2.5 mm）的连接带。离线后采用折断或剪切的方法将连接带切开，就可切分成两个球扁钢。运用切分轧制技术成对轧制横断面不对称的轧件，既能保证产品质量，又能使生产率提高一倍。

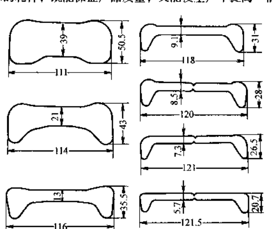


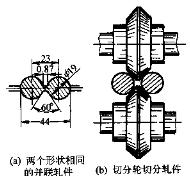
图 4.2-41 成对轧制双球扁钢的孔型系统

但是，总的来说，20 世纪 70 年代以前，切分轧制技术发展不快，应用也不广泛。

70 年代，在一些工业发达国家切分轧制技术又得到了一定的发展。70 年代中期，加拿大钢公司（Co—Steel）首先将切分轧制技术应用在小型连轧机上，生产螺纹钢筋和光园钢筋。随着切分轧制技术的进步，该公司切分轧制技术已采用第三种方式，即将一根轧件通过轧辊孔型轧成两个形状相同的并联轧件，再通过切分装置将左右对称的轧件切分成两根轧件。图 4.2-42 表示了切分装置采用切分轮切分轧件的示意图。

加拿大钢公司的切分技术除了在该公司子公司工厂应用外，还将切分轧制技术的有关专利进行出售。英国，美国、日本、原苏联、芬兰、挪威、韩国和我国等某些轧件相继应用了该公司的切分轧制技术。

1976 年日本钢管公司（NKK）从加拿大引进切分轧制技



(a) 两个形状相同的并联轧件 (b) 切分轮切分轧件

图4.2-42 切分轮切分轧件示意图

术，经试验研究后，于1978年在东伸钢铁公司姬路厂建立了切分轧制生产线。用150 mm方坯轧制 φ16 mm钢筋，小时产量比传统轧制方法提高40%。而且，这套轧机不需增加机架就可生产 φ13 mm和 φ10 mm的钢筋，与传统轧制方法相比，可少用4~6个机架。随后，该公司向本国工厂出售切分轧制技术，该技术应用于棒材生产取得了显著效果。

1983年我国首都钢铁公司在 φ300小型连轧机上引进了加拿大切分轧制的孔型设计和导卫装置两项专利技术。该连轧机共有16架轧机，第1~8架为粗轧机组，第9~16架为精轧机组。在精轧机组中，第11、13和15架为立式轧机，其余为水平轧机。图4.2-43为切分轧制的孔型系统示意图。由图可见，通过第9~12架轧机孔型的轧制，将轧件轧成具有较精确的弧边正方形。轧件从第12架轧机出来后，翻转45°进入第13架轧机孔型，其凹形的弧边便于轧件在第13架轧机孔型中找正和稳定。第13架轧机孔型是哑铃形孔型，轧件从该孔型出来后要翻转90°进入第14架轧机孔型。轧件在第13架孔型中已将弧边正方形轧件轧成哑铃形轧件，而第14架轧机孔型称为切分孔型，它能将对称的哑铃形轧件的两个形心外移，使其产生分离的趋势，再通过在第14架轧机出口处装有切分轮的导卫装置（图中未示出）将哑铃形轧件（为两个并联的形状相同的轧件）切分为两个单根轧件。最后，通过第15架和第16架轧机孔型的轧制可同时轧出两根成品轧材（图示成品孔型为圆钢）。

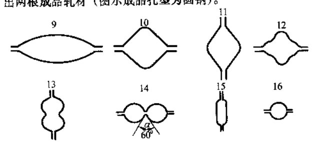


图4.2-43 300小型连轧机切分轧制孔型系统示意图
（图中9~16为轧机架次序号）

在我国还有不少单位对切分轧制技术进行了开发工作。例如，首都钢铁公司初轧厂在 φ850/φ650轧机上，进行过钢坯切分轧制；昆明钢铁公司轧钢厂线材车间在 φ350×2/φ280×6/φ280×8横列式轧机上，使用90 mm×90 mm连铸方坯，运用切分轧制技术生产 φ6.5 mm钢筋，其坯料比原工艺坯料68 mm×68 mm增加了32%。此外，武汉钢铁公司棒材厂、唐山钢铁公司棒材厂，大亚湾宝兴钢铁厂有限公司棒材厂、广州钢铁集团连轧厂等现代化连续式轧机上都应用了切分轧制技术，有的生产线上还进行三切分和四切分轧制技术的实践。切分轧制技术在我国得到了一定的发展。

(2) 轧制技术的主要特点

如上所述，自20世纪70年代以来，切分轧制技术在国内外的应用逐渐增多，这与该技术所具有的优越性密切相关。与传统的单根轧制方法相比，切分轧制具有以下优点：

1) 可显著地提高轧机生产率。对于型材轧机来说，由于切分轧制是多根并列轧制，同样的坯料生产同样规格的产品时，切分轧制可缩短总的纯轧时间，加快轧制节奏，使轧机生产率得到提高。例如，某厂采用切分轧制技术生产 φ12~16 mm带肋钢筋比单根轧制时轧机生产率提高50%。在生产 φ16 mm、φ18 mm钢筋时，单根轧制的日产量为900 t、1 600 t，而采用双线切分轧制技术后日产量提高到2 300 t、2 500 t，轧机生产率得到显著的提高。

此外，在生产同样规格产品时，由于切分轧制可以减少轧制道次，对现有轧机可以采用较大断面的坯料。例如，通常 φ400轧机采用90 mm方坯，如采用切分轧制技术，可以采用115 mm或125 mm方坯，这使坯料重量增加，提高了轧机生产率。

2) 降低能耗、节省能源。切分轧制可缩短轧制时间，轧件热量损失较少，在轧件终轧温度相同的情况下，坯料出炉温度对于切分轧制可比传统单根轧制时降低30~40℃，降低了加热炉的能耗。此外，由于轧制道数的减少，可以节省轧机电能消耗15%~20%。因此，采用切分轧制可节省一定的能源。

3) 降低成本。由于切分轧制技术可提高生产率，降低能耗，因而使生产成本降低。一般来说，采用切分轧制技术可使成本降低10%~20%。

4) 有利于与连铸坯相匹配。为了解决连铸坯与型钢轧机坯料的衔接，对连铸坯也应用了切分轧制技术、使连铸机能够仅仅浇灌某几种规格的板坯或扁坯，通过切分轧制技术切分成型钢轧机所需要的各种规格的窄板坯或方坯，使其能在型钢轧机（棒材轧机或线材轧机等）上进行两线或多线轧制出成品轧材。这可使连铸机避免生产较难生产而为型钢轧机通常所需的60~90mm小方坯，提高了连铸机的生产率，并能进一步促进在型钢轧机与连铸机之间实现坯料断面和产量方面较好的匹配。

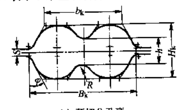
4.2 切分轧制技术的基本方法

在型钢轧机上采用切分轧制技术时，首先要在切分孔型系统中将一根轧件轧成具有两个或两个以上形状相同的并联轧件，再将并联的轧件切分开后进一步轧制出成品轧材。

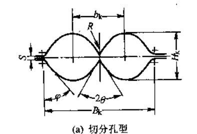
(1) 切分轧制孔型系统

在切分轧制孔型系统中，预切分孔型和切分孔型是使轧件切分的关键孔型。

图4.2-44表示了某些预切分孔型和切分孔型的示意图。



(a) 预切分孔型



(a) 切分孔型

图4.2-44 预切分孔型和切分孔型示意图

预切分孔型呈哑铃形状（或称狗骨形状见图 4.2-44a）其作用是通过孔型凸出部分（称为切分楔）对由上一架轧机轧出的轧件进行压下定位，并精确地分配并联的对称轧件的断面积。

在预切分孔型中轧件变形特点是轧件变形严重不均匀。由于切分楔完成压下定位，必须压下一定深度以尽可能减少切分孔型的负担，故在轧件连接带处压下系数远大于轧件其他部分的压下系数，轧件连接带处变形量大，其内应力也大。在设计预切分孔型时，切分楔的形状和尺寸要合理并要耐磨，其顶部要有 $R>2$ mm 的圆角过渡。

切分孔型是由两个（或多个）形状相同的并联孔型和切分楔组成（见图 4.2-44b），该孔型的作用是通过切分楔对预切轧件的连接带继续进行压下，使连接带的厚度符合能将两个（或多个）并联轧件切分开的需要。在切分孔型中轧件的不均匀变形更加严重。在设计切分孔型时，切分楔的夹角 2θ 要大于预切分孔型中的切分楔夹角，以增加切分楔的楔劈作用。切分楔要耐磨和抗冲击，其顶部要有 $R>0.5$ mm 的圆角过渡。对小型型材来说，切分楔夹角一般为 60°～65°。

(2) 切分装置与轧辊切分法

从切分孔型中出来的并联轧件，通过切分装置或采用轧辊切分法将薄面窄的连接带切断，使其沿纵向切分或两根（或多根）轧件，以便进行进一步的轧制。

常用的切分装置是圆盘剪和切分轮。此外，还可采用轧辊切分法。

1) 采用圆盘剪切分轧件。如图 4.2-45 所示，2 号孔型为预切分孔型，已将轧件轧成哑铃形状。在 3 号切分孔型中将并联轧件的连接带轧薄。使其厚度达到可以切分的要求。在 3 号轧机后安装了圆盘剪，以便将连接带切断而使并联轧件分离成两根轧件。圆盘剪的两个刀片做成圆盘状。切分后的两根轧件通过 4 号和 5 号孔型轧制出成品轧材。

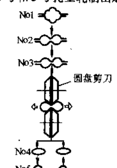


图 4.2-45 采用圆盘剪切分轧件
(No1～No5 为轧机和孔型的序号)

2) 采用切分轮切分轧件。该法是在具有切分孔型的轧机后安装了一对切分轮（参见图 4.2-42b），切分轮是通过沿纵向前进的轧件带动旋转将轧件切分的。

切分轮切分轧件的效果与切分轮顶角的选择有关。图 4.2-46 是切分轮切分轧件时力学分析图。由图可见，切分轮两侧外缘对轧件连接体进行压下时，使连接体在 x 轴方向产生水平分力 N_x，连接体就是通过水平分力 N_x 将其切分的。

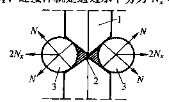


图 4.2-46 切分轮切分轧件受力图
1—切分轮；2—连接体；3—并联轧件

为了能实现连接体顺利切分，切分轮顶角（两侧外圆的夹角）应大于切分孔型中切分楔的夹角。例如，对于小型材切分孔型切分楔夹角取为 60°时，切分轮的顶角取为 90°～95°。

3) 采用轧辊切分轧件。用轧辊切分轧件是通过特殊的孔型设计，使轧件在该孔型中进行轧制的同时实现轧件的切分，此法也称为辊切法。

辊切法的辊切孔型是倾斜配制在轧制线上，如图 4.2-47 所示的四线切分轧制孔型系统中，孔型 9 是预切分孔型，孔型 10 是切分孔型，而与轧制线倾斜布置的孔型 11 即为辊切孔型。辊切孔型能将并联轧件进行切分是通过轧件在该孔型中产生旋转力偶而实现的。图 4.2-48 表示了辊切孔型的形状及其切分轧件原理图。由图 4.2-48b 可见，在孔型 $B—B$ 断面上，上轧辊的工作直径小于下轧辊工作直径，由于上下轧辊工作直径不同，使上轧辊圆周速度小于下轧辊圆周速度，对轧件形成一个向上的力。在孔型 $C—C$ 断面则是上轧辊工作直径大于下轧辊工作直径，这对轧件形成一个向下的力。这两个力就对轧件产生一个力矩，使轧件旋转而在孔型边部 A 处将并联的轧件切分开。切分后的轧件将自动扭转，使椭圆形长轴以垂直状态进入下一孔型轧制。

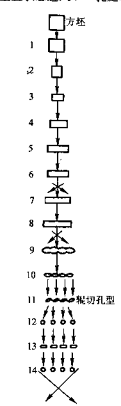


图 4.2-47 四线切分轧制孔型系统

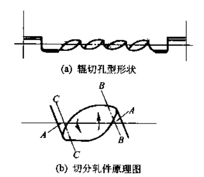


图 4.2-48 辊切孔型形状及切分轧件原理图



轧辊切分法与切分轮切分法具有不同的特点和使用场合。表 4.2-16 列出了这两种切分轧件方法的特点和使用场合。

表 4.2-16 切分轮切分法与轧辊切分法特点和使用场合

切分方法	切分轮切分法	轧辊切分法
特点	在切分孔型轧机出口处装有一对切分轮，通过两道工序完成轧件的切分：(1) 在切分孔型中将轧件轧成形状相同的并联轧件；(2) 通过切分轮将并联轧件切分成单根轧件	在轧机组中不需要装设专门的切分设备。在轧制线上的辊切孔型中在轧件轧制成形的同时将轧件切分 即将切分轮切分法中"先成形"、"后切分"两个工序合并为一个工序
使用场合	由于切分轮是非传动装置，要通过沿纵向不断运动的轧件带动切分轮旋转来切分轧件，故适用于连轧机组	由于轧件在辊切孔型中轧制成形时自动切分，故既适合于连轧机组，也适合于横列式机组
	由于切分轮结构小，切分能力有限，仅能切分连接体厚度较小的轧件，它要求轧机辊跳值小，故该法适用于高刚度轧机	由于在辊切孔型中可以切分连接体厚度稍大一些的轧件，故可应用于刚度低一些的轧机

4.3 切分轧制技术在型钢轧机上的应用

切分轧制技术能够应用在各种布置形式的型钢轧机。一般来说，切分轧制技术在小型、线材轧机（或棒、线材轧机）上应用较多。如前所述，小型、线材轧机的主要布置形式有横列式，半连续式和连续式。

(1) 在横列式型钢轧机上的应用

图 4.2-49 表示了切分轧制技术在横列式轧机上的应用。由图可见，在横列式轧机上应用切分轧制技术时，可以在开坯机组、中间机组或精轧机组对轧件进行纵向切分。这取决于哪个机组是薄弱环节。如果切分孔型的轧机与其下一架轧机之间通过辊道连接，则对轧件进行纵向切分时以采用辊切法切分为宜（也可用圆盘剪进行切分）。如果切分孔型的轧机与其下一架轧机之间通过围盘连接，则可采用切分轮对轧件进行纵向切分。

图 4.2-50 为某线材车间平面布置图。该车间轧机布置为横列式。粗轧机组为两架 $\phi350$ mm 轧机，中轧机组为六架 $\phi280$ mm 复二重式轧机，精轧组为八架复二重式轧机。在采用切分轧制前的坯料为 68 mm×68 mm 方坯，经粗轧 7 道，中轧 6 道，精轧 8 道共 21 道次，生产 $\phi6.5$ mm 圆钢或钢筋。采用切分轧制技术后，坯料采用 90 mm×90 mm 方坯，在粗轧第七道次切分成 29 mm×29 mm 方坯，在中轧机组和精轧机组进行双线轧制成两条（两盘）$\phi6.5$ mm 圆钢或钢筋。其切分孔型系统如图 4.2-51 所示，预切分孔型切分楔厚度为 10 mm，夹角为 90°，切分孔型切分楔厚度为 4 mm，夹角为 90°。

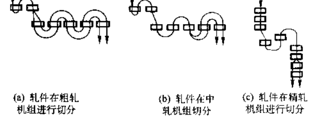


图 4.2-49 切分轧制技术在横列式轧机上的应用

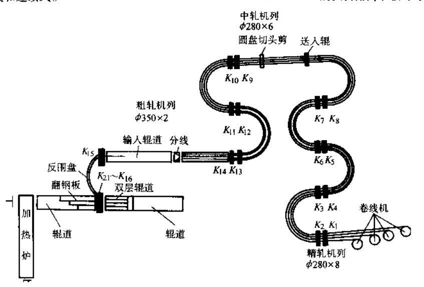


图 4.2-50 某线材车间平面布置图

(2) 在半连续式型钢轧机上的应用

半连续式小型（棒材）轧机与连续式轧机的差别主要是在粗轧机组，前者的粗轧机组多为一架或两者横列式布置的轧机，而中轧机组和精轧机组则多为连续式布置。一般是在精轧机组采用切分轧制技术，将轧件沿纵向切分的方法与连续式轧机一样，可采用辊切法或切分轮法。

(3) 在连续式型钢轧机上的应用

切分轧制技术在连续式小型、棒线材轧机中得到了较为广泛的应用，在新建的棒材轧机中，小规格钢筋的生产多以切分轧制的形式生产，日本钢管公司（NKK）棒材轧机的最高终轧速度已达到 24 m/s，意大利某厂可达 26 m/s。在 20 世纪 90 年代我国引进的一些连续式小型轧机中也引进了切分轧制技术。而且，唐山钢铁公司棒材厂除对 $\phi16$、$\phi18$ mm 螺纹钢筋用两线切分轧制技术外，还能对 $\phi12$、$\phi14$ mm 螺纹钢筋进行三线切分轧制技术。广州钢铁集团连轧厂还从德国引进了四切分轧制技术生产 $\phi10$、$\phi12$ mm 螺纹钢筋。在连续式轧机上，轧件切分采用切分轮法或辊切法。

一般来说，连续式小型棒材轧机的切分孔型系统有两种布置形式：①从成品孔型前第 5 架开始，第 3 架为切分孔型，轧件切分后经两个道次轧制出成品（图 4.2-52a）；②从成品孔型前第 7 架开始，第 5 架为切分孔型，轧件切分后经 4 道次轧制出成品（图 4.2-52b）。

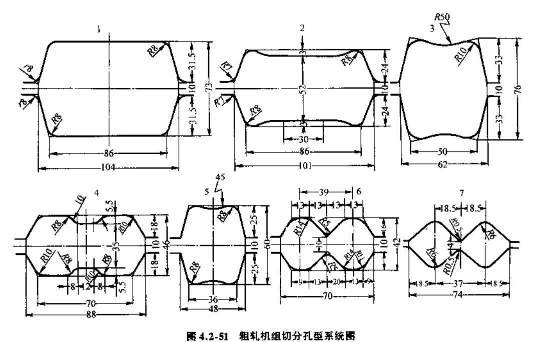
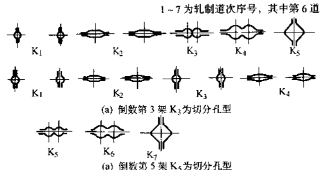


图 4.2-51 粗轧机组切分孔型系统图

1～7 为轧制道次序号，其中第 6 道次为预切分孔型，第 7 道次为切分孔型

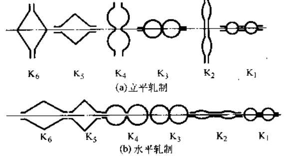


(a) 倒数第 3 架 K_3 为切分孔型

(a) 倒数第 5 架 K_5 为切分孔型

图 4.2-52 切分孔型系统的两种布置形式

根据精轧机组轧机型式不同，切分后的轧件到成品孔型的轧制过程中有两种轧制情况：①立平（或平立）轧制。切分后轧件通过立平（或平立）交替布置的轧件进行立平（或平立）轧制。如图 4.2-53a 的立平布置轧机切分轧制孔型系统图所示，切分后的轧件自切分孔型 K_3 中出来后，在 K_2 孔型中进行上下立式平行轧制，而在 K_1 孔型中进行水平平行轧制。②水平轧制，轧件切分后通过水平布置的轧机进行水平平行轧制，其切分轧制孔型系统如图 4.2-53b 所示。



(a) 立平轧制

(b) 水平轧制

图 4.2-53 立平轧制和水平轧制切分孔型系统

K_1—双线成品孔型；K_2—双线椭圆孔型；K_3—切分孔型；K_4—预切分孔型；K_5—弧边方孔型；K_6—菱形孔型

在采用切分轮切分轧件时，在切分孔型轧辊出口处装有切分导卫装置，其示意图如图 4.2-54 所示。切分导卫由卫板 2、切分轮 3、双槽卫板 4 组成。卫板 2 将轧件由切分孔型轧辊 1 导向切分轮 3，将一根轧件切分成两根轧件 5。这两根轧件 5 同时进入双槽卫板 4，而一根轧件 5 向上弯，另一根轧件 5 向下弯，但两根轧件 5 都朝同一方向前进。切分后的轧件根据是水平轧制还是立平轧件的不同情况，再进入相关的导卫装置和轧机继续轧制出成品。

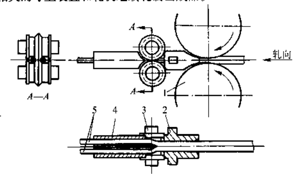
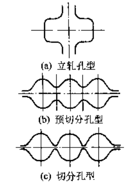


图 4.2-54 切分导卫装置示意图

1—切分孔型轧辊；2—卫板；3—切分轮；4—双槽卫板；5—轧件

近年来，在连续式小型、棒材轧机上还采用了三切分和四切分的轧制技术。

图 4.2-55 是某厂三切分轧制的孔型系统示意图。该厂轧制线共有 18 架轧机，在第 14 架轧机上配置了立轧孔型，第 15 架和第 16 架轧机分别配置了预切分孔型和切分孔型，经



(a) 立轧孔型

(b) 预切分孔型

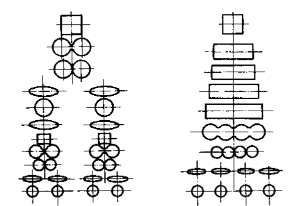
(c) 切分孔型

图 4.2-55 三切分轧制技术孔型系统示意图



17和18架轧机轧制出成品。

图4.2-56为实现四切分轧制技术的两种方案。第一方案是先在粗轧机组将一根轧件切分为两根，然后在精轧机组将这两根轧件分别进行切分为四根轧件。第二种方案是将轧件在精轧机组一次进行四切分成四根轧件。我国某厂采用了第二种方案进行四切分轧制。该厂轧制线上共有18架轧机，粗轧、中轧和精轧机组各为6架轧机，轧件出口处最高轧制速度为18 m/s。原始坯料150 mm×150 mm方坯，第15架轧机为预切分孔型，第16架轧机为切分孔型，出该轧机时一根轧件切分为四根、经第17和第18架轧机轧制成 $\phi10$ mm、$\phi12$ mm 的成品轧材。采用四切分轧制技术，可使产量提高2倍以上。

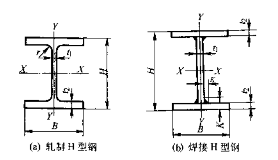


(a) 二次切分将一根轧件切分成四根 (b) 一次切分将一根轧件切分成四根

图4.2-56 四切分轧制技术的两种方案

5 H型钢生产

H型钢按照生产方法可分为轧制H型钢和焊接H型钢(其断面形状和尺寸代号如图4.2-57所示)。



(a) 轧制H型钢 (b) 焊接H型钢

图4.2-57 轧制H型钢与焊接H型钢

H—高度；B—宽度；t_1—腹板厚度；t_2—翼板厚度；K—焊脚高度

H型钢除按生产方法分为轧制和焊接两种外，轧制H型钢和焊接H型钢中按其断面形状和尺寸，又可分为多种类别。各个国家都制定了相应的H型钢标准，使H型钢的生产规范化，以利于更好地推广和应用。

目前，我国针对H型钢制定标准有以下三个：

《热轧H型钢和剖分T型钢》GB/T 11263—1998；

《焊接H型钢》YB/T 3301—1992；

《结构用高频焊接薄壁H型钢》JG/T 137—2001。

在H型钢的三个标准中，对H型钢的分类、尺寸系列、外形、重量、允许偏差、技术要求、检验规则、包装等都作了明确的规定。

5.1 轧制H型钢的生产工艺

(1) 轧制H型钢的生产工艺流程

轧制H型钢工艺流程如下：

坯料（连铸坯或初轧坯）→加热→开坯→切头尾→万能粗轧机轧制→万能精轧机轧制→倍尺分段→冷却→矫直→定尺分段→检查分类→打捆→成品入库

轧制H型钢使用的坯料有连铸坯和初轧坯两种：

① 连铸坯。用于轧制H型钢的连铸坯有矩形坯、异型坯和板坯三种。矩形坯主要用作中小型H型钢轧机的坯料。异型坯主要用作大中型H型钢轧机的坯料。用异型坯来轧制H型钢，其效率和质量都优于矩形坯，但由于H型钢的规格繁多，连铸机不可能为此而准备多种异型坯的结晶器，并频繁地更换结晶器。因此，连铸异型坯的使用受到了一定的限制。

② 初轧坯。初轧坯也有异型坯和矩形坯两种。一般生产400 mm×200 mm尺寸以上的H型钢用异型初轧坯，小于400 mm×200 mm的H型钢用矩形初轧坯。比之连铸异型坯，初轧异型坯的尺寸精度高、表面光洁、质量好，成材率高。

(2) 轧制方法

为保证轧制H型钢的质量，许多生产H型钢的轧线上都配置了除鳞装置，在轧前用高压水去除热坯表面的氧化铁皮。

轧制H型钢的轧制方法尽管多种多样，但轧制过程中的核心就是万能轧机，H型钢的成型，主要就是在这种轧机上完成的。

万能轧机就是在该轧机的机架内同时装有两个水平辊和两个立辊（如图4.2-58所示），上下两水平辊和左右两个立辊中心线在同一垂直平面内，组成了一个四辊孔型。H型钢的腰部（腹板）是在上下水平辊间，腿部（翼缘）是在两侧立辊间被轧制成形的。万能轧机所形成的孔型，可使轧件断面上的各个组成部分同时受到压缩，变形均匀；断面各部分的速度差异小，轧件的内应力小；水平上下和侧面左右的压下量可以单独调整，便于H型钢的尺寸控制，操作简便。

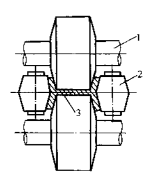


图4.2-58 万能轧机示意图

1—水平辊；2—立辊；3—H型钢

按照传统的划分方式，H型钢的轧制方法可分为格雷式(Grey)、普波式（Puppe）和卡式（Carnegie）等轧制方法。

1) 格雷式轧制方法。图4.2-59为格雷式轧机，首先采用二辊式初轧机和开坯机把连铸坯或钢锭轧成所需的异型坯，然后再在由万能轧机和轧边机组成的万能粗轧机组中进行数道次的往复可逆连轧，最后在万能精轧机组中进行数道次往复连轧成成品。格雷式轧制方法的特点是在万能轧机中使用圆柱形立辊，轧件外部外侧始终保持平直，但也因此而使H型钢边部内侧斜度较大。

2) 普波式轧制方法。该轧制方法是在普波式轧机中进行的。这种轧机是由一个二辊可逆式初轧机以及两个顺列式布置的万能轧机组成的。普波式轧法与格雷式轧法的不同点

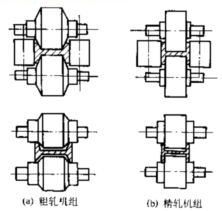


图 4.2-59 格雷式轧机

是轧件的腿部是斜的，且精轧不设轧边机。在第一个万能轧机中把来自初轧机的异型坯在开口的四辊孔型中轧成凹边，其水平辊侧面有 7% 的斜度，它等于立辊的锥度。在万能精轧机中使用圆柱形的立辊，其水平辊的侧面斜度随所轧 H 型钢的形式不同而不同，一般为 1.5%～9%。这种轧制方法可以在通过万能精轧机架的第一道次中，用圆柱形的立辊把 H 型钢的边部轧平直，然后在返回的道次中把立辊分开，此时水平辊的辊环压下边端，见图 4.2-60a、b。也可以在万能精轧机中首先压下边端而不首先把边部压直，特别是在前几道次中边部的纵向稳定性较大，这时在单数道次中万能精轧机架的立辊和水平辊都分开，轧件空过，在返回道次中用水平辊压下边端，见图 4.2-60c、d；或者在单数道次中用万能精轧机架的立辊把边部压直，这时水平辊不与轧件接触，在返回道次中用水平辊压下边端，见图 4.2-60e、f。在最后一道次用水平辊和立辊对轧件全面进行较小的压下，见图 4.2-60g。

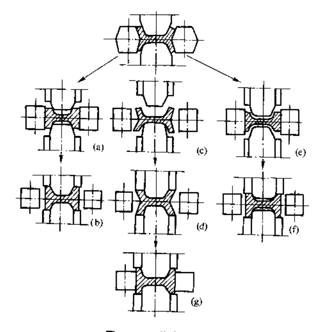


图 4.2-60 普泼式轧制法

(a) ～ (g) —各道次示意图

3) 卡式轧制方法。卡式轧机是在普泼式轧机的基础上发展起来的轧机。它是用一台开坯机或大直径初轧机供给异型坯，其后设置有一组万能粗轧机组和一组万能中轧机组（机组由万能轧机和二辊轧边机组成，并实行可逆连轧），最后设置有一架万能精轧机，无轧边机。

(3) 轧机布置型式

近十五年来，世界上新建的大型 H 型钢轧制生产线，其轧机的布置型式和轧制的方法，都在上述传统方法的基础上有了进一步的改进和发展。这些生产线上轧机的布置大体有四种方式：

1) 1－2－1 布置（图 4.2-61）。主轧线由 1 架开坯机（BD），1 架万能轧机和 1 架轧边机（U_R－E）组成的可逆式粗轧机组和 1 架万能精轧机（U_F）构成。在 BD 和 U_R－E 上都要轧制多个道次，在万能精轧机（U_F）只一个道次。这种布置作业线短，设备少，但生产率比较低，仍属于传统式的布置。

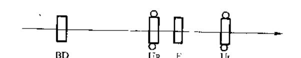


图 4.2-61 1－2－1 布置形式

2) 1－3－1 布置（图 4.2-62）。轧线由开坯机—可逆式粗轧机组—精轧机三部分构成。开坯机（BD）1 架，可逆式粗轧机组由 2 架万能轧机和 1 架轧边机（U_{R1}－E－U_{R2}）组成，精轧机（U_F）1 架万能轧机。在 BD 机上有二个轧腰孔型和一个轧高孔型，在此往复轧制 5－15 个道次。在可逆式三机架连轧机上往复轧制 3－5 个道次，成品最后在万能精轧机（U_F）上轧制一道。

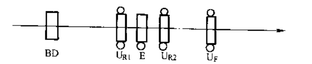


图 4.2-62 1－3－1 布置形式

1－3－1 布置型式轧机的架数较多，需要 1 架大规格开坯机，3 架万能轧机和 1 架轧边机，但生产可靠，操作灵活方便，换辊少，特别是成品只在最后万能精轧机轧制一道，尺寸精度有保证。

新的 1－3－1 布置，将中间三架可逆式连轧机由原来的 U_{R1}－E－U_{R2}（万能轧机—轧边机—万能轧机）变为 U_{R1}－U_E－U_{R2}的布置方式，即用万能轧机 U_E 代替 E 轧边机，且 U_{R1}、U_E、U_2 三架万能轧机规格完全相同。当轧边时，U_E 轧机的立辊可不用。这样的好处是所有的万能轧机规格相同，备件少，生产的灵活性大，除生产 H 型钢外还可生产其他型钢；缺点是轧边机 E 换成万能轧机 U_E，轧机及传动都要加大。

3) 1－3 布置。主轧线由开坯机—可逆式连轧机组二部分构成。开坯机（BD）1 架，可逆式连轧机组由 2 架万能轧机和 1 架轧边机（U_R－E－U_F）组成。在可逆式连轧机组中的最后一架 U_F 可设计成为可分离式，在往复轧制时第三机架 U_F 抬起，只有（U_R－E）二架投入轧制，在轧制最后一道时 U_F 机架投入。此即谓 X－H 轧制法。

这种轧制法也可在每一次往复轧制中（U_R－E－U_F）机组的三个机架包括 U_F 机架全部都投入轧制，但 U_F 机架的压下量只有 U_R 量的 50% 以下，这样可有更高的生产率，但 U_F 机架的轧辊磨损也会比只在最后一道投入要大得多。

1－3 布置的特点是：轧线短，省掉了 1 个万能精轧机架及其前后的平行升降辊道，设备质量轻，可以有效地降低投资。但最后的 U_F 机架如果既当粗轧又当精轧，其轧辊的磨损较严重。

1－3 布置中也可采用另一种新的轧制方法，它与常规的轧制法还不同。常规的轧制法中开坯机（BD）至少要有一个轧腰孔型和一个轧边孔型。新的轧制法在 BD 机上只轧

边不轧腰，这样 BD 机架就可设计得很小。对三机架可逆式连轧机，将传统的（U_R - E - U_F）改为（U_R - U_E - U_F），即将 E 由二辊轧边机改为四辊万能轧边机，其功能与 U_1 相似，既轧边又轧腰。

4）全连续轧制。通常也采用串列式布置，图 4.2-63 是一种由 5 个万能机架和 3 个轧边机组成的连轧机组示意图（一）；图 4.2-64 是一种由 7 个万能机架和 4 个轧边机组成的连轧机组示意图（二）。

图 4.2-63 和图 4.2-64 所示的 H 型钢连轧车间，其主要性能见表 4.2-17。

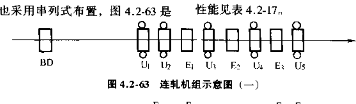


图 4.2-63 连轧机组示意图（一）

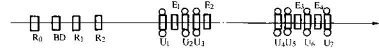


图 4.2-64 连轧机组示意图（二）

表 4.2-17 H 型钢连轧车间主要性能表

机组	粗轧机组				中间机组					精轧机组					
参数	R_0	BD	R_1	R_0	U_1	U_2	U_3	E_1	E_2	U_4	U_5	U_6	U_7	E_3	E_4
轧辊尺寸 /mm	ϕ850 L1 200	ϕ1 150 L2 500	ϕ850 L1 200	ϕ850 L1 200	平 ϕ1 200 立 ϕ900	同左	同左	ϕ750 L700	同左	同 U_1	同 U_1	同 U_1	同 U_1	同 U_1	同 E_1
电动机容量 /kW	1 500	1 400	2 300	1 750	1 500	同左	同左	500	同左	2 500	同左	同左	1 500	500	同左
允许负荷/t	700	1 000	700	700	平 1 000 立 400	同左	同左	1 500	同左	同 U_1	同 U_1	同 U_1	同 U_1	同 E_1	同 E_1
转速 /（r/min）	500	0 ~ 40 ~ 100	500	500	200 ~ 500	同左	同左	同左	同左	140	165	420	495	200	300
速 比	19.1	直流	12.7	9.55	16.04	11.21	8.32	8.02	4.253	4.49	3.69	3.03	3.19	2.613	2.028

注：R—二辊轧机；BD—可逆轧机；U—四辊轧机；E—轧边机。

该车间的原料为重 8.3 t，长 10 m，断面尺寸为 532 mm × 399 mm 的初轧异形坯，可生产 100 mm × 50 mm ~ 500 mm × 200 mm 的 H 型钢，并可用控轧工艺生产低温用 H 型钢和高强度 H 型钢。这个车间由 15 架轧机组成，粗轧机组共有四架二辊轧机 R_0、BD、R_1、R_2，其中 BD 为可逆轧机；中间机组有五架轧机，U_1、U_2、U_3、E_1、E_2，U 为万能轧机，E 为轧边机；精轧机组共有六架轧机 U_4、U_5、U_6、U_7、E_3、E_4，轧件在各机组实行连轧，每架均由直流电机传动，采用最小张力控制，轧制速度可达 10 m/s。成品轧件长 120 m，取消了热锯，代之以长尺冷却，长尺矫正，冷锯锯切，使后部工序全部实现了连续化。连轧线全部采用计算机控制，年产量 140 ~ 150 万 t。

（4）冷却方式

1）轧制 H 型钢的残余应力。轧制 H 型钢几何断面的特点是腰薄，腿与腰的厚度比一般为 1.5 ~ 2.0，加上轧制时冷却水的影响，所以热轧后的 H 型钢边腿温度比腹腰温度高，差值可达 150℃。因此在自然冷却过程中，边腿收缩量大，产生拉应力；腹腰收缩量小，产生压应力。其腰部残余应力为 300 MPa 左右，边部残余应力为 250 MPa 左右。

残余应力降低了 H 型钢的抗弯强度；当残余应力值超过金属屈服点时必然要产生塑性变形，则腰部产生浪形，造成 H 型钢产品几何形状不合格；有时还会造成 H 型钢的扭曲甚至裂纹。因此，如何减少残余应力是生产 H 型钢的关键性技术问题之一。

2）冷却方式。合理地选择冷却方式对消除变形减少残余应力至关重要。

常用的冷却方式是对热轧后的 H 型钢边部进行喷水冷却，以控制腹腰和边腿的温度差。但喷水冷却法在边腿沿长度方向冷却不够均匀。在实际生产中，还采用在冷床上对边腿进行喷雾冷却的方式，使边腿沿长度方向上冷却趋于一致。

H 型钢在冷床上的放置方式，对 H 型钢冷却过程中的腰、腿部温度差有很大的影响。

由图 4.2-65 可见，立放方式比平放方式 H 型钢腿部散热条件好，利于使 H 型钢腹腰和边腿各部温度均匀。

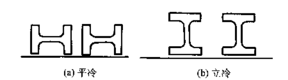


图 4.2-65 H 型钢的平冷与立冷

5.2 焊接 H 型钢的生产工艺

焊接 H 型钢的生产工艺流程如下：

坯料准备和供给→腹板和翼板的组装→H 型钢成型焊接→矫直→切定尺→检查涂装→包装。

图 4.2-66 是一条连续式焊接 H 型钢生产线的立体示意图。

（1）坯料准备和供给

1）钢板切割供料。用单张或对接的所需厚度的钢板，在精密自动切割机上进行多条切割。为了保证焊接的质量，通常还要对切割后的原料进行矫直，对作腹板的原料进行侧面加工。这种供料方式为单条定长度供料，用于非连续生产线上。

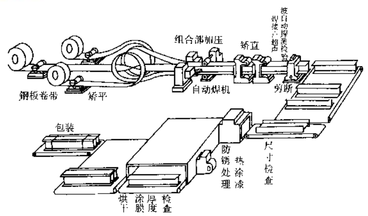


图 4.2-66 连续式焊接 H 型钢生产线的立体示意图

2）成卷带钢切断供料。按腹板和翼板的不同宽度和厚度选择不同的成卷钢带，经过开卷→矫直→切断，将三块原料分别送入组装工序。这种供料方式也是单条定长度供料，用于非连续生产线上。

3）成卷带钢连续供料。一个按腹板厚度、宽度选定的带钢钢卷和二个按翼板厚度、宽度选定的带钢钢卷，经三台开卷机同时开卷、矫直后同时供料。这种供料方式是成卷连续供料，用于连续自动 H 型钢焊接生产线。

（2）腹板和翼板的组装

1）将单条的一个腹板和二个翼板送入组装台，在组装台内依靠专用模具、夹具等，对 H 型钢的腹板和翼板分别实施定位夹紧、输进等，各动作的完成依靠液压或气动，整个过程可以通过程序控制实现。

2）用于成卷连续供料时，腹板和二个翼板的带钢分别按直立和水平位置呈“T”形，同时进入焊机前的夹送定位装置，该装置与焊机紧密相连。

（3）H 型钢成形焊接

采用自动焊机对组装好的 H 型钢的四个角焊缝进行焊接，完成焊接 H 型钢的最主要工序。

1）在非连续 H 型钢焊接生产线上，多采用单条焊缝的自动焊，焊接方式为埋弧焊或 CO_2 气体保护焊。焊接通常是在一个船型焊胎上进行的，图 4.2-67 是这种焊胎的示意图。其设计制造的要点就是要使运载自动焊机走行的轨道中心线与定位后的被焊 H 型钢中心线平行，以保证焊缝全长平直无偏斜。

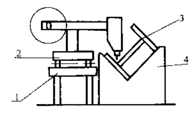


图 4.2-67 焊胎示意图

1—底座；2—焊具移动小车；3—被焊 H 型钢；4—焊胎

这种 H 型钢的焊接方法效率虽较低，但在生产大中型焊接 H 型钢和各类特种断面焊接 H 型钢时，这种方法却是最适用的。

2）在连续式 H 型钢焊接生产线上，用高频焊机对四条焊缝同时进行焊接，完成连续生产中的连续焊接成形。这种焊接方式，适用于小型或轻型焊接 H 型钢的生产。

（4）矫直

H 型钢焊接过程中产生的热应力，造成了焊后 H 型钢的变形，这种变形可分为二类，各自采用不同的矫直方法来纠正这种变形。

1）第一类变形——沿 H 型钢长度方向的大曲率变形如拱形和侧弯等。对这种变形可采用压力矫直机进行矫正，压力矫直机的支点常用辊式，支点间的加压方式多用液压。

采用火焰加热，也是矫正这种变形的有效方法。

2）第二类变形——翼板的热变形，也称角变形。这种变形是 H 型钢焊接过程中最常见的变形，通常都用辊式矫直机直接对翼板进行矫正。

矫直原理如图 4.2-68 所示。上矫直辊可以按被矫 H 型钢的断面尺寸、采用锥形或圆柱形。

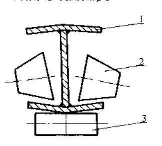


图 4.2-68 翼板矫直原理

1—焊接 H 型钢；2—上矫直辊；3—加压驱动辊（下辊）

5.3 H 型钢生产的新工艺和新设备

随着 H 型钢应用领域的不断拓宽和深化，大大推动了 H 型钢生产技术的发展；近些年来，尤其是轧制 H 型钢的新工艺和新设备方面，取得了十分突出的成果，其主要表现在下述诸方面：

（1）高效短流程的 H 型钢生产车间被广泛重视和首先选择

年产量 50～100 万 t 左右，采用连铸→热送热装→连轧工艺，设备布置紧凑，生产率高，产品结构灵活，投资见效快，是一种经济、节能型短流程生产线。

（2）广泛采用异型坯作 H 型钢的生产原料

尽管连铸异型坯的使用受到了连铸结晶器的种类和更换的限制，但由于用异型坯轧制 H 型钢能够减少开坯轧制道次提高了轧机产量；能使轧制变形均匀，大大降低了腹板中心偏差，保证了尺寸精度；开坯机上轧件变形小，故切头切尾短，成材率高。

异型坯的种种优点，已使其成为发展研究的重要课题。

1）掌握异型坯的凝固规律和冷却制度，完善连铸结晶器的设计和制造，生产出高质量的异型连铸坯。

2）连铸机用的钢液全部经过精炼；采用全封闭式保护浇铸。

3）开发单一异型坯轧制多种 H 型钢的新技术，简化连铸机的生产品种，提高连铸机的生产效率。

(3) 采用先进的步进式加热炉

可单排或双排布料；步进梁移动行程可调，可适用不同规格原料的装料要求；采用独特的水梁设计消除加热黑印；实现加热过程的全自动控制，即炉料的跟踪和整个移动过程的准确定位控制，钢温在线模拟及按最佳加热曲线进行各段炉温自动设定，加热炉燃烧、炉压、空燃比、换热器等系统的自动控制等，这些技术的应用可使钢坯加热均匀，加热温度控制准确，同时可减少钢坯的烧损和空气污染，并节省燃料。

(4) 研制开发外部尺寸一定的H型钢

一般的轧制H型钢，由于受设备的制约，腹板高度、翼缘宽度等外部尺寸是随着翼缘厚度和腹板厚度不同而变化的，即其内部尺寸一定，外部尺寸是变化的。但是，由于H型钢大量应用于建筑结构中，面外部尺寸一定的H型钢具有良好的施工性，所以，希望H型钢的外部尺寸能够一定。

生产外部尺寸一定的H型钢主要采用内宽缩小法，它包括两项主要技术：宽度可变的万能水平辊技术和腹板高度缩小轧制法。宽度可变的万能水平辊技术是指能在短时间内使万能水平辊的宽度得到调整，有效地控制腹板的内宽。腹板高度缩小轧制法是在预先设定水平辊宽度后，再设定宽度小于轧制坯料的腹板内宽的立辊，利用立辊压下翼缘外面，得到规定的外部高度。

(5) 采用先进的控制冷却技术—— QST (Quench Self Temper) 工艺

QST工艺是在终轧后对钢梁进行快速水冷（淬火），使其表面生成马氏体，并在钢梁中心冷却前停止水冷，利用中心余热进行回火。

QST工艺具有以下优点：产品屈服强度提高 100~150 MPa，金相组织好，韧性好，改善了焊接性能；可通过改变QST工艺条件，获得不同的机械性能；生产成本低。

(6) 采用新技术提高轧机轧制精度

1) 轧辊采用液压平衡，轴承采用滚动轴承以及应用辊缝“0”位自动调整技术，使轧机辊缝调整精度可达 ±0.01 mm。

2) 应用轧辊轴向动态调整技术，有效防止和克服翼缘厚度尺寸出现的偏差。

3) 万能精轧机采用液压AGC厚度自动控制装置及电动偏心轴调节式腹板导位等，可确保轧制出高精度的产品。

4) 在轧制过程中对轧辊线速度快速调整，防止长轧件的头、尾偏差，缩短轧制节奏，提高机时产量。

(7) 采用先进的工业计算机自动化系统

采用工厂级计算机管理系统、生产过程计算机控制系统与基础自动化控制系统的三级控制系统，并采用先进的网络控制技术，可完成工厂过程控制和生产经营管理等。

(8) 长尺精整技术

1) 长尺冷却。不用热锯或者尽量减少热锯的锯切次数，以提高轧件在冷床上的冷却质量，并提高成材率。

2) 长尺在线矫直。既提高了矫直效率，又提高了矫直质量。

6 冷弯型钢

冷弯型钢是指在常温状态下，采用某种机械加工方法（包括冲压弯曲、弯折弯曲、拉拔弯曲和辊式弯曲成形等）将热轧或冷轧板带钢（包括镀锌、镀铝板及各种有机塑料涂层板）沿横断面方向弯曲成所需断面形状和尺寸的型材。因为冷弯型钢的单重轻，断面经济合理，惯性力矩大，断面系数高，使用时节约金属，故称其为轻型薄壁经济断面型钢，又称高效型材。它的高效性体现在与热轧型钢相同的情况下，冷弯材比热轧材转动惯量提高 50%~62%，断面系数提高 0.5~3 倍。

6.1 冷弯型钢产品的类型

我国冷弯型钢产品一般按断面形状分为开口断面型钢及闭口断面型钢两大类。

(1) 开口断面冷弯型钢

开口断面冷弯型钢可以分为结构型钢和建筑型钢。通用开口断面冷弯型钢有等边与不等边角钢、等边与不等边槽钢、内卷边或外卷边槽钢、Z形钢、卷边Z形钢和专用异形开口型钢。我国通用冷弯开口型钢外形尺寸见表 4.2-18。部分开口断面冷弯型钢外形见图 4.2-69。

表 4.2-18 通用冷弯型钢外形尺寸

型钢名称	尺 寸/mm
冷弯等边角钢	∟ 20×20×1.2 ~ ∟ 100×100×6.0
冷弯不等边角钢	∟ 25×25×2.0 ~ ∟ 120×80×6.0
冷弯等边槽钢	20×10×1.2 ~ 200×80×6.0
冷弯不等边槽钢	30×20×10×3.0 ~ 150×60×50×3.0
冷弯内卷边槽钢	40×40×9×2.5 ~ 400×50×3.0
冷弯外卷边槽钢	30×30×16×2.5 ~ 100×30×15×3.0
冷弯Z形钢	80×40×2.5 ~ 100×50×3.0
冷弯卷边Z形钢	100×40×20×2.0 ~ 250×75×25×4.0

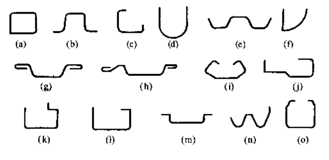
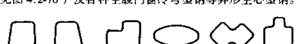


图 4.2-69 部分开口断面冷弯型钢外形
(a) 铁路车辆用上侧梁；(b) 铁路车辆端墙横带；(c) 内卷边角钢；(d) 护舷板；(e) 高速公路护挡板；(f) 铁路客车用边梁钢；(g) 钢板桩（一）；(h) 钢板桩（二）；(i) 火槽钢；(j) 电柜框架钢；(k) 半凸形钢；(l) 半内卷边槽钢；(m) 帽形钢；(n) W形钢；(o) 异形内卷边槽钢

(2) 闭口断面冷弯型钢

闭口断面冷弯型钢亦称空心冷弯型钢，是经过焊接的闭口形断面的冷弯型钢，按形状可分为圆形、方形、矩形和异型。冷弯型钢与焊接钢管的区别主要是：焊接钢管是用于输送流体如煤气、水、石油、液化气和蒸汽等，要求钢管能承受一定的压力；而冷弯型钢用于制造结构或建筑结构，在承受外来力时，对其截面、形状、尺寸和力学性能等有一定的要求。

我国闭口断面冷弯型钢除圆、方、矩形管外，还有梯形管、不等边槽管、缺角钢窗管、椭圆管、双菱管、凸形管（见图 4.2-70）及各种空腹门窗冷弯型钢等异形空心型钢。



(a) 梯形管 (b) 不等边槽管 (c) 缺角钢窗管 (d) 椭圆管 (e) 双菱管 (f) 凸形管

图 4.2-70 部分闭口断面冷弯型钢外形

方、矩形管及圆管闭口冷弯型钢的需求量不断增大，其断面尺寸范围也不断扩大，方形管：20 mm × 20 mm × 1.2 mm ~ 500 mm × 500 mm × 16 mm，矩形管：30 mm × 20 mm（1.5 mm ~ 600 mm × 400 mm × 1.6 mm，圆管：ϕ21.3 mm × 1.2 ~ 610 mm × 16 mm。

此外冷弯型钢如按产品厚度和展开宽度来分类，则可分为大型、中型、小型和宽幅等四种，见表 4.2-19。

表 4.2-19　冷弯型钢按产品厚度和展开宽度分类

mm

分　　类	厚　　度	展开宽度
大型冷弯型钢	6 ~ 16	600 ~ 2 000
中型冷弯型钢	3 ~ 6	200 ~ 600
小型冷弯型钢	0.5 ~ 3.0	30 ~ 200
宽幅冷弯型钢	0.5 ~ 4.0	200 ~ 1 600

6.2　冷弯型钢的材质要求

冷弯型钢以碳钢为主，还有耐候钢、低合金高强度钢和不锈钢等。

通常用于制造冷弯型钢的碳钢，应采用符合现行国家标准《碳素结构钢》GB/T 700 规定的 Q235A – D，Q 代表钢的屈服强度，235 代表屈服强度值，A – D 代表等级；A 级是最低要求，因其含碳量可不作交货条件，故 Q235A 级钢不宜在焊接结构中使用，B、C、D 级逐步提高要求，同组钢号还有 Q195 和 Q215。

低合金强度结构钢也可用于制造冷弯型钢，其代表钢号为 Q345A – B，其屈服强度 > 345 MPa，相当于钢号 16Mn，现标准号为 GB/T 1591 – 1994。

高耐候结构钢也可用于制造冷弯型钢。现行标准的代号为 GB/T 4171 – 2000，代表钢号为 Q295GNHL，该钢种含有少量铜和磷，具有良好的耐大气腐蚀性能。为改善加工性能和提高耐候性能与力学性能，另加入少量的稀土、钛、钒、镍、铬等微量元素。这类钢目前已大量用于制造铁路客货车辆和海运集装箱等。

由耐海水腐蚀钢加工的冷弯型钢可用于制造海上石油平台的上层结构，宝钢研制的耐海水腐蚀钢钢号为 Mariloy C41A 和 S50A。

冷弯型钢也可采用耐火钢，钢结构的耐火性能已倍受关注，武钢和宝钢已研制成功耐火钢，武钢的牌号为 WGJ510C2。

不锈钢冷轧钢带用于制造家电和装饰用冷弯型钢，其代表钢号为 Cr18Ni18，现行标准为 GB/T4239。

用于承重结构的冷弯薄壁型钢，应具有抗拉强度、伸长率、屈服强度、冷弯试验和硫、磷含量的合格保证；对焊接结构尚应具有碳含量的合格保证。

原材料质量对冷弯成形过程的稳定性和产品质量的影响很大。坯料的结晶组织不应有游离渗碳体，否则弯曲部分会产生裂纹和表面麻点；金相组织要均匀，晶粒大小要适宜，对坯料的尺寸公差也要求很严，宽度公差为 ± 2.5 mm，边缘与中心两处之间每 40 mm 宽的厚度差不应超过 0.1 mm；镰刀弯每米长度上不应超过 1.0 mm。

6.3　冷弯型钢的成形特点与成形过程

（1）冷弯型钢的成形特点

冷弯型钢的成形特点是将金属在常温状态下进行弯曲成形，成形前后板带厚度不变；成形后各部位（线段）中性线的展开长度之和等于原板宽度。

冷弯型钢的成形可通过冷拔弯曲、折弯弯曲、冲压弯曲和辊式弯曲等方法获得。辊式弯曲成形是冷弯型钢生产普遍采用的方法，该方法是将板卷或板带钢在连续通过一组纵向排列的相对旋转轧辊，并顺次逐步改其横断面的形状，最终达到适合使用要求的断面形状和尺寸的成形方法，它是一个连续弯曲成形过程。辊式成形方法的显著优点是：生产效率高，产品表面质量好，品种规格多样，能耗省，成本低，轧件长度不受限制，可以生产出用其他压力加工方法难以生产或不能生产的复杂断面型钢。

辊式冷弯成形时板带沿纵向逐步完成横向局部塑性弯曲形或各种异形断面，而不产生纵向塑性伸缩，这种变形属于二维变形，即平面变形。为保证板带冷弯成形而又不产生裂纹的必要条件是弯曲断面上的最大正应力 σ_{max} 应大于屈服强度 σ_s 而小于断裂强度 σ_b，即要符合 $\sigma_s \leqslant \sigma_{max} \leqslant \sigma_b$ 的条件，正应力 σ_{max} 值的大小取决于轧件的厚薄和弯曲程度。

弯曲成形时横断面的弯曲变形区内，弯曲件的外层纤维受拉面伸长；内层纤维受压而缩短，在缩短和伸长两个区域之间，有一层纤维的长度不变，称为中性层，它在横断面上形成的弧线称为中性线。由于外层应变为一拉一压，很容易造成减薄变形，面内层为压应变，不利于塑性流动，再加上成形辊凸起圆角的刚性接触，使金属无处流动，只好使中性层内移，因而使弯曲部位厚度减薄。

冷弯型钢的断面转角部分材料由于弯曲塑性变形出现冷作加工硬化，即强度提高，塑性下降，这种现象称为冷弯效应。若利用冷弯效应提高后强度进行构件设计，则可节约 10% ~ 15% 的钢材，也可作为提高冷弯型钢构件的强度安全储备。

（2）冷弯型钢的成形过程

板带钢的辊式冷弯过程是一个连续弯曲成形过程，即在同一时间内各对轧辊都与坯料长度方向上的相应部位接触，如图 4.2-71。

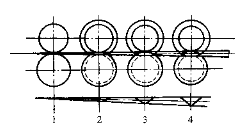


图 4.2-71　连续弯曲过程示意图

1、2、3、4 为变形过程的次序号

弯曲变形过程一定时，与坯料移动方向相垂直的坯料横断面在整个弯曲变形过程中都不会改变其垂直位置，而只会改变其形状，逐渐成为所需的断面形状。在辊式成形过程中要使带钢边缘伸长量不超过该钢种的弹性极限延伸量。该延伸量在机架间距一定的条件可用弯曲角度变化量来表示。

辊式成形过程中还有一重要条件是选择合理的最小弯曲半径，如图 4.2-72。

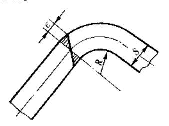


图 4.2-72　弯曲半径与变形

成形处的弯曲半径为 R，带材厚度为 S，从图可知各层纤维沿纵向的变形量与其距中性层的距离成正比、与弯曲半



径成反比。最外层的纤维变形 ϵ 的计算公式为：

$$\epsilon = \frac{S}{2R + S} \quad (4.2\text{-}1)$$

冷弯成形时弯曲变形受材料极限变形率的限制，否则弯曲处将出现裂纹和折断。材料的极限应变为 ϵ_b，由式（4.2-1）可求出最小弯曲半径 R_{min} 为：

$$R_{min} = \frac{S}{2}\left(\frac{1}{\epsilon_b} - 1\right) \quad (4.2\text{-}2)$$

用材料的极限伸长率 δ_s 表示，则式4.2-2可改写为：

$$R_{min} = \frac{S}{2}\left(\frac{1}{\delta_s} - 1\right) \quad (4.2\text{-}3)$$

以普通碳钢为例，$\delta_s = 25\%$，其最小弯曲半径 $R_{min} = 1.5S$。

最小弯曲半径还与弯曲角大小有关，在弯曲半径相同的条件下锐角弯曲比钝角弯曲的破裂可能性要大，为避免破裂的发生，在弯曲角不能改变的条件下只能加大弯曲半径。不过有些型材不仅要求有锐角弯曲，而且要求有小的弯曲半径，此时可以采取的措施是将弯曲角分成几步来压成，采用每段压弯和多次压弯都有利于减小弯曲半径。

对板带钢进行退火处理，也可明显减小其弯曲半径。材料表面质量在弯曲过程中也起重要作用，粗糙表面易于产生裂纹，故圆角半径很小的冷弯型钢要求带钢表面较光滑。

冷弯成形各机架中线高度的调整对成形质量有重要意义。成形后的弯曲翼缘内产生纵向拉力可使型材的底板向翼缘侧翘曲。为了顺应这种趋势，在多机架的冷弯机组中各中线高度可以调成凹曲线分布状态，使轧制线与成形中线相一致。

6.4 辊式冷弯成形生产工艺及其设备组成

（1）辊式冷弯成形生产工艺

辊式冷弯成形生产工艺主要有下列几种类型：

1）开口断面冷弯型钢生产工艺。开口断面冷弯型钢的工艺流程如下：

纵剪带钢卷→上卷→开卷→预矫直→切头尾→带钢头尾对焊→活套贮料→辊式成形→成品矫直→定尺切断→检查收集→包装→称量→标记→入库。

开口断面冷弯型钢生产工艺用于生产非焊接的冷弯型钢产品，因此工艺流程中没有直缝焊接。按生产产品的专业化程度又可分为一般用途的开口断面冷弯型钢工艺，如生产角钢、槽钢、C形钢、Z形钢等，这种工艺的成形机架数较少（一般为8~12架），机架结构较简单；另一种为专门用途的开口断面冷弯型钢生产工艺，每条机组生产的产品比较单一，如轻钢龙骨成形机组、构架型钢成形机组、自行车或摩托车轮圈成形机组等，成形机架数较多，可多达36架以上，除成形外还可以增设各种辅助加工工序，如冲孔、切口、弯边等。

2）空心闭口断面冷弯型钢生产工艺。空心闭口断面冷弯型钢的工艺流程如下：

纵剪带钢卷→上卷→开卷→预矫直→切头尾→带钢头尾对焊→活套贮料→辊式成形→高频焊接→去除焊接外（内）毛刺→焊缝冷却→整形→焊缝探伤检查→成品矫直→定尺切断→端面加工→检查收集→打捆包装→称量→标记→入库。

冷弯方矩形管及异形空心管的生产工艺可分为两种，一种工艺是"先焊接，后成形"也叫"圆变方"工艺，另一种工艺是"先成形，后焊接"也叫"方变方"工艺。前者首先将板带材经过数道轧辊孔型的弯曲变形通过高频焊接成为圆形，然后冷弯整形成为所需断面的空心型钢，如方、矩管和椭圆管等。它是在焊管生产基础上发展起来的。国内生产薄壁，小型空心断面型材多采用先成圆后成方（异）的工艺。

"先成形，后焊接"工艺是首先把板带材在辊式成形机上直接弯曲成所需断面形状和尺寸的空心型材，然后再焊接成封闭的空心型材。这种工艺的优点是：只要成形机架的数目符合变形道次的要求，则产品的断面形状不受限制，与圆变方工艺比较这种工艺的产品断面角部形状较好，相对内圆弧半径较少，且边部平直，外形较规整。生产大规格且壁厚较大的空心型材多用此工艺。

3）宽幅冷弯型钢的生产工艺。宽幅冷型钢的辊式冷弯成形的生产工艺特点如下：

① 由于带坯宽度大、弯曲角多、因而需要较多的成形道次（16~36道次）。

② 在弯曲成形过程中，带钢的横向牵拉相互作用大，因此必须考虑带坯在成形过程中的宽度伸长。

③ 由于宽幅冷弯型钢宽度较大，面横向刚度较小，因而极易出现横向弯曲缺陷。

④ 用于宽幅冷弯型钢生产的带坯一般为涂镀层带钢，因面对表面变形和表面质量的要求更严格。

宽幅冷弯型钢成形机组主要有两种类型：一种是单卷成形，另一种是单张成形。这两类机组的主要产品为波纹板。

4）几种特殊的辊式冷弯成形工艺

① 周期断面高刚性冷弯型钢生产工艺。通过这种工艺生产的冷弯型钢带有纵横波纹来增强刚性，具有更大的惯性矩和抗弯模量，提高承载能力。

② 冲切冷弯型钢生产工艺。这种工艺可以生产两类产品：冲孔冷弯型钢和冲延冷弯型钢（防滑板）。

③ 变断面冷弯型钢生产工艺等。这种可生产宽度可变的槽钢和横断面的沿长度方向变化的闭口型钢，变断面型钢广泛应用于各工业部门。

（2）辊式冷弯成形机组的类型

1）按生产工艺分类。按生产工艺可分为：单件成形机组、成卷成形机组和连续成形机组三种类型。

① 单件成形机组的特点是成卷带材在成形之前先剪切成定尺长度或直接使用定尺板料，将单张板料送入成形机进行单件成形，这种机组的设备简单，投资少；但生产效率低，产品质量差，只适用开口断面冷弯型钢的生产。

② 单卷成形机组的特点是采用成卷带材作原料，进行单卷成形。不需要带钢头尾剪切和对焊设备，机组设备组成较连续成形机组简单，面生产效率也较低些。这种类型的成形机主要用于不宜焊接或焊接困难的板带材料，如涂、镀层带钢、不锈钢带、铝带等。

③ 连续成形机组的特点是采用成卷带材作原料，在机组进料段进行带卷头尾剪切、对焊、矫直和活套储存等，带材连续不断地通过成形机冷弯成形。这类成形机组装备齐全，产品质量好，生产效率高，金属收得率高，应用于大规模工业化生产。

2）按产品品种分类。按产品品种可分为：开口断面冷弯型钢成形机组、通用冷弯型钢成形机组和宽幅波纹板型钢成形机组三大类。

① 开口断面冷弯型钢机组用于非焊接的普通冷弯型钢产品，如角钢、槽钢、内卷边角钢、内卷边槽钢、外卷边槽钢、C形钢、Z形钢等。

② 通用冷弯型钢机组既可生产断面较简单的非焊接的冷弯型钢产品，又可以生产焊接的冷弯型钢产品，如圆管、方管、矩形管、异型管及其他空心冷弯型钢。

③ 宽幅冷弯型钢机组主要用于生产建筑业、汽车制造业、铁路车辆制造业、集装箱制造业及造船工业等行业中的宽幅金属型钢，主要是波纹板。

3）按生产能力分类。按生产能力可分为轻、中、重型3种类型冷弯型钢机组。见表4.2-20。



表 4.2-20 按机组生产能力分类

型式	带厚/mm	带宽/mm	辊轴直径/mm	成形速度/ms^{-1}
轻型	1.2 以下	100 以下	35～50	0.5～1.5
中型	1.2～2.5	100～500	50～150	0.5～2.0
重型	2.5 以上	500～2 000	150～380	0.15～0.5

(3) 辊式冷弯成形机组设备组成

辊式冷弯成形机组可分为入口段、成形段和出口段三部分。

1) 入口段设备是用来完成板带坯料弯曲成形前的各种准备工作。入口段设备包括坯料上卷、开卷、预矫直、剪切对焊和活套贮料等设备。

2) 成形段设备是冷弯型钢机组的核心设备。开口断面冷弯型钢机组的成形段设备包括导向装置、成形机架、立辊机架和矫直机。闭口断面冷弯型钢机组的成形段基本设备组成为成形机组、焊接机组和整形定径机组。成形机组包括带钢导向装置、成形机架、立辊机架。焊接机组包括导向机架、加热设备、挤压辊、外毛刺刨除装置及冷却槽。整形定径机组有定径机架（与成形机架的结构相同）、立辊机架、焊缝在线检查装置、型钢矫直机。

3) 出口段设备是完成产品的定尺切断，分类收集等工作，包括切断设备、运输辊道、检查收集台架、包装打捆及称重等设备。

编写：施东成（北京科技大学）
徐能光（北京钢铁设计研究总院）
刘　炜（北京钢铁设计研究总院）
周　琳（北京钢铁设计研究总院）
孙克军（北京钢铁设计研究总院）
施元鼎（北京钢铁设计研究总院）

第3章　管材轧制成形

1　管材的特点、分类及基本要求

1.1　管材的特点

管材是一种具有中空的封闭断面，且长度与断面周长之比较大的多功能经济断面型材。钢管是国民经济不可缺少的主要钢材品种之一，其产量一般占钢材总产量的10%～16%。

钢管具有空心断面，可用作液体、气体和一些固体的输送管道，故钢管也称之为工业部门的“血管”。同时，钢管的抗弯、抗扭能力比同样面积的实心钢材大，因而成为制造各种机械和建筑结构的重要材料。例如在石油钻井、地质钻探、化工、建筑、锅炉制造、造船、机械制造、飞机和车辆制造，以及国防工业与日用轻工制品等行业中，均需要大量品种规格不同、技术要求不一的钢管。

1.2　钢管的分类

钢管的种类繁多，性能要求各异，从规格上看，尺寸范围很宽，目前，外径范围为 $\phi0.1 \sim 4\,500$，壁厚范围为 0.1～100 mm。为了识别其特点，钢管通常可按以下几种方法分类：

(1) 按用途分类

1) 管道用钢管。一般工作压力不大于6 MPa，用作暖气、水、煤气、天然气及石油的输送管道。

2) 热工设备用钢管。制造在高温、高压条件下工作的设备，如锅炉用的沸水管、火管、蒸汽过热器管、蒸汽再热器管以及蒸汽输送管道等热工设备用管。

3) 机械工业用钢管。用来制造液压缸、气缸、活塞、高压容器、滚动轴承内、外套，以及各种军械等机器零件。

4) 石油、地质钻探用钢管。在石油和地质钻探中使用的钻杆、固定井壁用的套管、取样用的岩心管、从油井中提取石油的油管、以及制造管接头的钢管等都属此类。

5) 化学工业用钢管。这类钢管包括炼油厂内输送石油产品管道、加热装置中的裂化管以及各种化工设备上其他用途的钢管。

(2) 按断面形状分类

钢管按断面形状可分为圆管与异型钢管两类，其中异型钢管又可分为壁厚沿横断面周边不变的等壁异型管和壁厚变化的异型管，以及壁厚和外径沿钢管长度方向上变化的纵向变截面管（图4.3-1）。

(3) 按材质分类

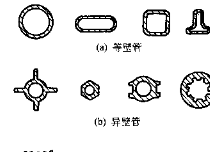
目前用来制造钢管的材质有普通碳素钢、优质碳素结构钢、合金结构钢、合金钢、轴承钢、不锈钢和双金属等，另外还有钢管表面采用镀或涂复其他材料，如镀锌和涂塑管等。

(4) 按管端形状分类

钢管端部形状有光管和车丝管两种，后者又可分为普通车丝管和管端加厚车丝管（图4.3-2）。若车间生产管端车丝管，则应设置管加工工段。

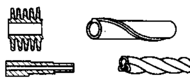
(5) 按钢管的外径 D 与壁厚 S 之比 D/S 值分类

钢管的外径 D 与壁厚 S 之比值 $D/S<10$ 为特厚管；$D/S=10 \sim 20$ 为厚壁管；$D/S=21 \sim 40$ 为薄壁管；$D/S>40$ 为特薄壁管。



(a) 等壁管

(b) 异壁管



(c) 纵向变截面管

图4.3-1　钢管按断面形状分类



(a) 光管　(b) 普通车螺纹管　(c) 加厚管

图4.3-2　钢管按管端形状分类

1.3　钢管的技术要求

(1) 技术要求的内容

各种钢管的技术要求在国家标准（GB）、原冶金部部颁标准（YB）或专门的技术协议中有明确的规定，其主要包括以下内容：

1) 品种规格。规定钢管应具有的断面形状、尺寸及其允许偏差、理论质量等。圆管规格通常以 $D \times S$ 表示，例如 $\phi50 \times 2$ mm 表示钢管的外径为 $\phi50$ mm、壁厚为 2 mm。尺寸精度有壁厚精度、外径精度和椭圆度等。

2) 表面质量要求。规定钢管的内外表面状态和表面允许缺陷存在的程度等。

3) 化学性能。规定钢种化学成分和P、S的最大含量以及试验方法等。

4) 组织和物理性能。规定钢种应具有的金相组织、机械性能和工艺性能等。

5) 检验标准。规定检验项目、取样部位、试样形状和尺寸、试验条件和方法等。在钢管生产中除了与其他钢材一样采用常规的试验项目外，为满足使用要求，尚需进行一些工艺性能试验。

6) 交货标准。规定钢管交货验收时钢管的包装、标记的方法，以及质量证明书的内容等。

(2) 各类钢管的主要技术要求

由于钢管的工作条件和用途不同，对它的技术要求亦不同。

1) 管道用钢管。对这类钢管的机械性能、表面质量和几何尺寸精度均无特殊要求，但应进行水压试验，以测定其承载能力。对焊管均需进行水压试验，以保证焊缝质量。这类钢管一般采用甲类钢或优质低碳结构钢制造。

2) 热工设备用钢管。高压锅炉中的工作压力10～

14 MPa，温度一般在450℃左右，有的过热器和再热器的管壁温度高达600～620℃。因此，对这类钢管不但要求具有良好的室温机械性能，而且还须具有好的高温性能（包括高温强度与塑性、抗氧化抗蚀性和组织稳定性等）、弯管和焊接等工艺性能。这类钢管采用优质碳素结构钢、低合金结构钢和高合金钢制造。成品除经热处理和水压试验外，还要做力学性能、低倍组织和显微组织检验，以及进行压扁、扩口、卷边和弯管等工艺性能试验。

3）机械工业用钢管。这类钢管的特点是要求具有较高的几何形状尺寸精度、良好的机械性能和表面质量，有的还要求具有良好的耐磨性。这类钢管一般多用优质碳素结构钢、低合金结构钢或专用钢来制造。

4）石油、地质钻探用钢管。这类钢管在工作时受很大的工作应力，并经受地下水、气的高压和腐蚀作用，故应具有较高的强度和抗腐蚀能力。这类钢管均采用优质中碳钢和低合金钢制造，成品需进行车螺纹加工，为保证螺纹部分强度和密封性，有的在车螺纹前先进行管端加厚。这类钢管出厂时应配上管接头和保护套，以防在运输过程中损坏螺纹。

5）化学工业用钢管。对于在工作温度800℃、压力10 MPa，并在腐蚀性介质下工作的裂化管，用合金钢制造；对于工作温度低于450℃、压力不超过6 MPa的裂化管，可采用10钢和20钢制造；对于工作压力在32 MPa以上（最高达200 MPa）、工作温度为-40～400℃，并且长期与腐蚀介质接触的化肥等化工设备用管，应具有良好的抗腐蚀性能、光洁的表面，采用不锈钢或其他合金钢制造，成品应进行动载荷试验及金相组织检查。

为了满足各类钢管的使用要求，钢管生产工程技术人员必须熟悉产品标准和钢管材质的钢种特性，结合车间生产的具体条件，制订合理的生产工艺。同时产品技术条件将随使用部门的发展而提高，因面钢管生产厂需要不断挖掘潜力、改进工艺、提高装备水平和采用新技术，以满足用户要求。

1.4 钢管的轧制生产

钢管的主要生产方法有热轧（包括挤压）、焊接和冷加工三大类。焊接钢管的生产过程是将管坯（钢板、带钢或扁钢）用各种成形方法按直卷或螺旋方向卷曲成要求的形状，然后借助于加温加压的方法将缝隙焊接起来而获得钢管，因而焊接钢管的基本工序为成形和焊接。

钢管的轧制生产方法主要是热轧成形和冷轧成形生产方法。

（1）热轧无缝钢管生产

热轧无缝钢管的工艺过程是将实心管坯或钢锭穿孔并轧制成空心断面的钢管，它具有生产工序多和设备多样化的特点。无缝钢管的轧制生产过程有三个主要变形工序：

1）管坯穿孔——将实心坯（锭）穿轧成毛管。

2）延伸轧管——将毛管轧成接近要求尺寸的荒管。

3）定减径轧管——将荒管轧成要求尺寸的钢管。

热轧无缝钢管生产中管坯的穿孔主要是在斜轧穿孔机上进行的，直至20世纪70年代，在斜轧穿孔机中设有导板的斯蒂菲尔（Stiefel）穿孔机最为重要。在1972年诞生了狄塞尔（Diescher）穿孔机，它的主要特征是轧辊的上下配置和导盘水平方向设置。20世纪80年代初，轧辊水平布置的锥辊式穿孔机宣告再生，为使锥辊式穿孔机的工艺优越性和Diescher穿孔机设计结构上的优越性结合起来，随后研制了一种轧辊上下布置的新式锥辊式穿孔机。

轧管机类型不同，必须为它配备在变形量和生产率方面都匹配的穿孔机和其他前后工序的设备。这样，实际上不同的轧管机就构成了相应的轧管机组，而热轧无缝钢管的生产方法是以机组中轧管机的类型来分类的，一般有：自动轧管机组、连轧管机组、三辊轧管机组、周期式轧管机组、顶管机组、狄塞尔轧管机组、三辊行星轧管机组等。机组乃是实现某种制管方式的总称。一个机组的称谓以该机组产品的规格和轧管机类型来表示，如140自动轧管机组就是指产品最大外径为ϕ140 mm，轧管机为自动轧管机的机组。以热连轧钢管机组为例，其工艺流程见图4.3-3。

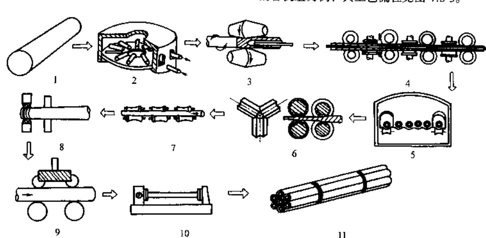


图4.3-3 热连轧钢管生产工艺流程图

1—管坯；2—加热炉；3—斜轧穿孔；4—连轧钢管；5—再加热炉；6—张力减径；7—钢管矫直；8—切管；9—无损探伤；10—水压实验机；11—成品包装入库

热轧无缝钢管的工艺过程包括：坯料准备；坯料加热；穿孔获得毛管；辗轧延伸获得荒管；精轧；精整；获得最终尺寸、性能符合要求的成品管。每个工序均需配备相应的机械设备。

（2）冷轧无缝钢管生产

钢管冷加工方法，包活冷轧、冷拔和旋压（横轧）三种。旋压本质上也是一种冷轧，冷轧机和冷旋压机的规格以其产品规格和轧机型式表示，冷拔机规格用其允许额定拔制力表示。以冷轧、冷拔应用最广泛。

冷轧钢管的直径为ϕ4～450 mm，壁厚0.4～60 mm，冷拔钢管的直径为ϕ0.1～760 mm，壁厚0.1～30 mm，旋压的钢管，直径可以到ϕ4 500 mm，壁厚0.4～40 mm。



因此，与热轧管相比，钢管冷加工方法有减壁能力强、断面减缩率大的特点。它可生产薄壁、极薄壁、大直径管、小口径管和毛细管；可生产几何尺寸精度高和表面粗糙度小的管材、异型和变断面管材，以及厚壁、特厚壁管材。

钢管冷加工的特点是变形道次多，反复循环次数多。现代冷加工钢管车间的主要设备有冷轧机、冷拔机、减径机以及其他一些附属设备，其中包括退火、酸洗、坯料准备和精整等设备。

冷轧被广泛应用于制造高合金钢（耐蚀钢、耐热钢以及难变形钢种）、合金钢和碳钢钢管。由于温轧既可极高金属的加工性能和产品表面质量，又可提高产品的机械性能和物理性能，所以近年来得到了较快的发展。冷轧时，一个周期的延伸系数可达2～7，当温轧（在变形区前将钢管加热到200～400℃）不锈钢和耐热钢时，一个周期的延伸系数可达16，采取温轧可提高轧机产量50%～100%。

冷轧管机主要型式有两种：二辊周期式轧管机和多辊式轧管机。此外，还有其他型式的一些冷轧管机，如行星轧管机、连续式冷轧管机、多排辊冷轧管机、组合式冷轧管机、固定机架的摆式冷轧管机及各种类型的旋压机等。二辊周期式冷轧管机被世界各国广泛应用。这种轧机的结构特点是：在轧制过程中，工作机架连同轧辊由曲柄连杆机构带动做往复运动，轧机由使机架轧辊作往复运动的主传动装置、工作机架、在轧辊极限位置设有送进和回转钢管的分配机构三部分组成。其主要变形工具是半圆形或扇形的孔型和具有一定锥度的芯棒。冷拔有较高的生产率和好的产品质量，使用的工具简单和便宜，设备简单，可以获得广泛的品种，有些品种如小口径薄壁管和异形管等，用其他方法是难以得到的。前苏联以发展冷轧为主，而美国、德国、日本和英国则大量发展冷拔。最近几年开始采用了钢管冷减径工艺，生产率大大提高，可获得50%～60%的总变形量，可制造直径很小的钢管（ϕ3～4 mm），而且和二辊周期式冷轧机相联合，更可发挥其优点。冷拔，可采用无芯棒，不动短芯棒和长芯棒拔制法，长芯棒拔制法可获得较大的延伸系数（>2），用这种方法可以拔出尺寸精度高和表面质量良好的钢管。现在又出现了游动芯棒拔制，双模过渡拔制，滚模拔制、多根拔制、连续拔制、温拔和超声波振动拔制等多种方法。由于冷拔时，摩擦功约占总功的50%～60%，所以采用恰当的润滑方式和润滑剂是非常重要。大吨位冷拔管机是液压传动的，现代最大吨位已达7 MN。

2 管材的原料

2.1 管坯

管坯有钢锭、连铸坯、热轧坯、离心铸造坯等，其种类选择包括断面形状和管坯钢冶炼方法。管坯横断面形状取决于穿孔方法，压力穿孔采用方形、带被浪边的方形和多角形；推轧穿孔采用方坯；各种斜轧穿孔，由于穿孔时管坯作螺旋运动，需采用圆形坯。管坯钢冶炼方法首先取决于钢管品种和技术条件，其次是穿孔方法。转炉冶炼、连铸坯是近代无缝钢管生产的重要发展方向。

（1）对管坯的要求

管坯质量的好坏是决定钢管质量的基本因素。为了保证穿孔过程的正常进行和获得高质量的钢管，必须对管坯的几何尺寸、低倍组织和表面状态等提出严格的要求。

管坯直径过大或椭圆度过大，会使穿孔时咬入条件变坏，还会因管坯直径压缩量过大而促使内折的产生。内部组织缺陷主要是指缩孔和中心疏松、非金属夹杂的集聚、气体的含量等。这种要求的严格程度，随钢管的用途和钢种不同而异。

最为重要的是管坯的表面质量，因为管坯表面上的任何缺陷都会影响钢管的质量，因此，彻底清理表面缺陷，是保证钢管质量和提高成材率的重要措施。检查表面缺陷可用人工检查、无损探伤、磁粉探伤、涡流探伤等。管坯表面缺陷一般用砂轮机、火焰清理器、风铲、剥皮车床等进行清理。

生产实践证明，钢管内外表面缺陷常常是由于非金属夹杂物集聚造成的。这是因为当进行热塑性变形时，由于有些非金属夹杂物不能承受大的塑性变形（特别是穿孔变形），使得金属致密性受到破坏。有些非金属夹杂物（氮化物、氧化物）常分布于晶界上，从而减弱了晶粒间的联系、使金属塑性降低，最终导致金属破裂。

（2）转炉钢坯和连铸管坯

广泛采用转炉冶炼钢管坯和连铸坯，是近代无缝钢管生产技术的重要发展趋势。自西格弗里德·容汉斯在20世纪50年代开始研究的连铸钢坯工艺获得成功后，由于连铸具有代替初轧开坯、节省投资和占地面积，金属得率高等一系列优点，50多年来，发展非常迅速。但是，采用连铸坯轧管坯只是近40年的事。

把钢水直接浇铸成所需断面尺寸坯料的连铸过程和轧制坯的生产过程相比较，连铸省去了铸锭、脱模、均热炉加热和初轧开坯等工序，节省了大量能源，降低了金属消耗及投资费用，因而，连铸坯比轧制坯约便宜10%～15%。用连铸坯轧管，最突出的优点就是可以大幅度地降低钢管生产成本。

连铸坯和钢锭相比较断面较小，凝固速度快，固态金属组织比钢锭致密，成分偏析小。近几年来，连铸坯生产中采用了保护渣及侵入式水口浇铸技术，其表面状态大为改善。但是，连铸坯的金属组织呈铸造状态，晶粒粗大，横断面上外层为等轴晶区，中间层为柱状晶区，芯部为等轴晶区。连铸坯的组织疏松，特别是坯芯疏松，中心有裂纹，其塑性远远低于轧制坯。

（3）管坯剪切和定心

进入轧管车间的管坯，一般都是5～7 m的长料，为了获得不同规格的钢管所需的管坯长度，就需要进行坯料的切断。轧制定尺长度的热轧钢管时，管坯长度公差不超过±10 mm，当超过这一公差生产薄壁管时，毛管长度就可能超过轧机所允许的长度。管坯切断的方法主要有：剪断、折断、锯断和火焰切割等4种。选用哪种方法主要考虑所切断管坯的尺寸和材质，同时考虑设备费用和能源。

连铸坯的抗拉强度比轧制坯的抗拉强度高，如果采用锯切切断，则锯片的进给速度比锯切同规格、同钢种的轧制坯小得多，因而效率极低。如采采用剪断，则剪切力大，需要大型剪断机，特别是连铸坯存在中心裂纹，韧性又差，剪切过程中由于剪切力的作用，其横断面上的金属常被撕裂，造成“剪裂”缺陷，严重影响钢管质量。由于管坯本身就有较大的椭圆度，再加上铸造组织比较疏松，在冷剪机上剪切时，端面将产生更大的椭圆度（即压扁度）。

管坯斜轧穿孔之前常需进行定心操作，定心即为了在穿孔时使顶头鼻部正确地对准管坯的前端作一个不深的圆孔，称为定心孔。管坯定心可以减少毛管前端的壁厚不均，并改善穿孔时的咬入条件。通过管坯前端定心使管坯前端变形后的凹陷增大，有利于对准顶头鼻部，从而前端壁厚不均减小。通过定心可以改善二次咬入条件，这是因为增加了顶头前的压下量，某些合金钢穿孔时压下量较小，为了实现正常的二次咬入和防止前端壁厚不均，定心就很有必要。因定心可增大接触面积，从而增大曳入摩擦力，有利于实现二次咬入。

对于合金钢管坯通常在专用机床上钻孔，称为冷定心。对于一般管坯则采用效率高的热定心，即管坯经加热后，在

送往穿孔机途中用定心机打出定心孔。热定心机有液压和气动两种。

2.2 管坯加热

管坯加热的目的在于为穿孔和轧管准备良好的加工组织和改善金属性能。一方面加热可使管坯提高塑性、降低变形抗力及减少能量消耗，另一方面在加热过程中可改善钢的组织性能（如获得单相的固溶体组织、溶解碳化物、初生带状组织的非金属相的扩散等）。但加热过程中也会带来缺陷，如金属表面被氧化而形成氧化皮，增加了金属消耗；金属表面层脱碳或渗碳，使金属表面质量降低。由于表面层脱碳将会降低轴承钢管的性能（如表面硬度、疲劳强度、耐磨性能），不锈钢在加热过程中会产生增碳现象，降低不锈钢的抗蚀性能。

管坯加热一般分低温加热阶段和高温加热阶段。低温加热阶段往往是一些特殊合金钢的关键时期，因为这时钢的导热性差，塑性低，因此，选择加热速度时必须注意。在高温加热时期主要问题是如何保证沿管坯横断面和长度上加热均匀，改善组织结构，减少脱碳、氧化以及防止过热、过烧。

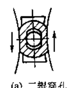
管坯的加热是保证钢管质量和正常穿孔所必须条件，对高合金钢和重要用途钢管尤为重要，温度准确，加热均匀，减少烧伤损是管坯加热的基本事求。所用的加热炉有斜底连续加热炉、环形加热炉、步进式加热炉和分段式快速加热炉。目前多采用前二种。

3 管坯轧制穿孔

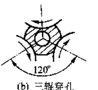
热轧无缝钢管生产第一变形阶段的穿孔工序很重要，一是要求穿孔提供较高尺寸精度的毛管，因下游延伸机对穿孔毛管的尺寸公差无法改进；二是能毫无问题地穿轧连铸坯，因连铸坯的低成本将增强无缝钢管的竞争力。从穿孔机结构和穿孔过程变形特点来看，现有穿孔方法可分为斜轧穿孔、压力冲孔和推轧穿孔三种。穿孔工序主要是由斜轧穿孔机完成，而用卧式或立式水压冲孔机对管坯进行冲孔，因工艺上的限制（管坯单重小、壁厚公差不佳），一般仅仅在顶管机组、周期轧管机组和挤压机组中用于将方坯或八角形坯冲成空心坯，而推轧穿孔工艺是在 20 世纪 70 年代才出现。

3.1 管坯斜轧穿孔

斜轧穿孔分为二辊和三辊穿孔两种形式，如图 4.3-4 所示。二辊斜轧穿孔法是德国人曼内斯曼（Mannesmann）兄弟于 1883 年发明，1886 年用于工业生产的。斜轧穿孔工艺经过不断的发展，完全能满足穿孔阶段的要求。迄今，斜轧穿孔工艺在无缝钢管生产中用得最为广泛。斜轧穿孔工艺的最新发展，已为穿孔毛管带来了远比以前大得多的加工灵活性，且具有更大的生产潜力。



(a) 二辊穿孔



(b) 三辊穿孔

图 4.3-4 二辊和三辊穿孔示意

普通二辊斜轧穿孔是轧件在由两个相对于轧制线倾斜布置的主动轧辊，两个固定不动的导板和一个位于中间的随动顶头（但轴向定位）构成的一个“环形封闭孔型”进行的轧制。如果轧辊左右放置，导板上下配置，则称为二辊卧式斜轧穿孔机（如图 4.3-5）。新的二辊斜轧穿孔机的轧辊上下放置，并可将导板换成主动导盘在左右配置，则称为二辊立式斜轧穿孔机——狄塞尔（Diescher）穿孔机。

斜轧过程是一个独特的连轧过程，管坯咬入后，由轧辊带动而获得螺旋运动，即管坯既旋转又前进。管坯每与轧辊接触一次，即受一次加工，依次通过变形区，经咬入、穿孔、管壁减薄、平整内外表面、均匀壁厚和规圆而形成具有要求尺寸的毛管。因此，轧件作螺旋运动是斜轧穿孔及其他斜轧过程的运动学条件。这个条件是靠各轧辊同向旋转和空间布置（即空间平行或空间交错）来实现的。轧辊是主传动的外变形工具；导板是固定不动的外变形工具。导板不仅为管坯导向，而更重要的是封闭孔型外环，限制管坯的切向变形。顶头是内变形工具，管坯内径由零扩大至要求值，这种变形主要靠顶头来实现。

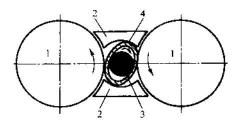


图 4.3-5 固定导板的二辊穿孔机孔型示意

1—轧辊；2—导板；3—顶头；4—空心坯

三辊斜轧穿孔（如图 4.3-4b 所示）与二辊斜轧穿孔不同的是，它以三个主动轧辊和一个顶头构成封闭孔型，取消了导板，具有可穿钢种范围广，毛管内外表面质量高，穿孔效率高，毛管尺寸比较稳定等优点。

二辊斜轧穿孔机由于轧辊形状的不同，有三种形式；斜轧穿孔机不论轧辊形状如何，为了保证管坯咬入和穿孔过程的实现，都由穿孔锥（轧辊入口锥）、辗轧锥（轧辊出口锥）和轧辊轧制带（入口锥和出口锥之间的过渡部分）三部分组成，如图 4.3-6 所示。二辊斜轧穿孔机多采用桶形轧辊。盘式轧辊穿孔机很少用。锥形轧辊的菌式穿孔机，是由瑞士人斯蒂菲尔（Stiefel）于 1899 年发明的，它与普通二辊斜轧穿孔机的不同点，在于轧辊除倾斜一个前进角外，还倾斜一个辗轧角，实质上是带辗轧角的二辊式斜轧穿孔机。

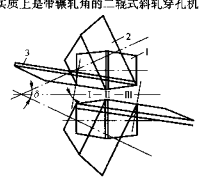


图 4.3-6 三种形式的二辊斜轧穿孔

1—桶式；2—菌式；3—盘式；

Ⅰ—入口锥；Ⅱ—轧制带；Ⅲ—出口锥

3.2 二辊斜轧穿孔变形过程

（1）斜轧变形区

普通二辊斜轧穿孔的变形区由轧辊、顶头和导板构或，如图 4.3-7 所示。由图中可以看出，整个变形区是一个较复杂的几何形状，大致可认为，横截面是椭圆形或近似圆形（三辊穿孔），到中间有顶头阶段为环形变形区（如图 4.3-4a）中所示），在纵截面上是小底相接的两个锥体，中间插入一个弧形顶头。



变形区形状决定着穿孔变形过程，改变变形区形状（决定于工具设计和轧机调整）将导致穿孔变形过程的变化。不过生产中常用的变形区形状大致是如此，只是在尺寸上有所差异，穿孔的整个变形区大致可以分为四个区域，如图4.3-7所示。

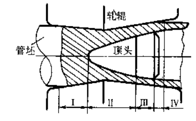


图4.3-7　斜轧穿孔变形区示意

Ⅰ区称为穿孔准备区（即轧制实心圆管坯区），该区从管坯与轧辊接触开始，到与顶头相遇为止。Ⅰ区的主要作用是为穿孔做准备和顺利地实现一、二次咬入，这个区域的变形特点是，由于轧辊入口锥表面有锥度，沿穿孔方向（轴向）前进的管坯逐渐在直径上受到压缩。被压缩部分的金属一部分向横向流动，坯料横剖面由圆形变为椭圆形；一部分金属，主要是表面金属向轴向延伸。因此，坯料前端面形成一个"喇叭口"状的凹陷，此凹陷和定心孔一起保证了顶头鼻部对准坯料中心，从而可以减少毛管前端的壁厚不均。

Ⅱ区称为穿孔区，该区从金属与顶头相遇开始到顶头辗轧锥为止，其主要作用是穿孔，即由实心坯变成空心毛管。这个区的变形特点主要是压缩壁厚。由于轧辊表面与顶头间的距离逐渐减小的，因此毛管一边旋转前进，壁厚一边受到压缩，是一个螺旋连轧过程。壁厚上被压缩的金属，同样可以横向流动（扩径）和纵向流动（延伸），但由于横向变形受到导板的阻止作用，纵向延伸是主要的。由于横向变形的结果，轧件横截面一般呈椭圆形，在此区段金属延伸变形很大，延伸系数可达5以上，从而对顶头的工作寿命影响是很大的，这是螺旋连轧变形特点之一。在三辊穿孔机上，轧件横截面在此区段中则呈圆三角形。

Ⅲ区称为辗轧区，该区在顶头的辗轧锥那一段。主要作用是辗轧（均整）管壁，提高壁厚的尺寸精度和内外表面质量。由于顶头母线和轧辊母线平行，所以压缩量很小，主要是起均整作用。轧件横截面在此区段也呈圆椭圆形。

Ⅳ区为转圆区，该区从毛管内壁离开顶头开始到毛管外面离开轧辊为止。作用在于靠旋转的轧辊逐渐减少直径上的压下量到零，把椭圆形的毛管转圆。该区的长度很短，变形特点实际上是无顶头空心毛管塑性弯曲变形。但由于这个区域很短而且变形力很小一般不予考虑。

（2）斜轧穿孔变形过程

第一个不稳定过程——管坯前端金属逐渐充满变形区的阶段，即管坯同轧辊开始接触（一次咬入）到管坯前端金属出变形区，这个阶段包括一次咬入和二次咬入。

稳定过程——穿孔过程的主要阶段，从管坯前端金属充满变形区到管坯尾端金属开始离开变形区为止。

第二个不稳定过程——管坯尾端金属逐渐离开变形区的阶段。

稳定过程和不稳定过程有着明显的区别，在生产中常见到的如一整根毛管头尾尺寸和中间有差异，一般是毛管前段直径大，中间部分直径大小比较一致，这是由于三个过程特点造成的。头尾几何尺寸偏差大是两个不稳定过程特征之一。造成头部直径大的原因是：前端的金属在逐渐充满变形区过程中，金属同轧辊接触面上的曳人摩擦力是逐渐增加的，到完全充满变形区后才达到最大值。当管坯前端与顶头相遇时，便受到强大的轴向阻力，虽然管坯在充满变形区过程中，这个阻力（可略去导板阻力，或将导板阻力包括在顶头阻力中）还将增大，然而其增大值与顶头前端的阻力相比，却显得很小，因而，处于第一个不稳定过程中的前端金属与稳定穿孔过程中的管坯金属相比，前者所受曳人摩擦力相对为小，轴向阻力相对为大。因此，金属向轴向延伸的阻力较大，使得轴向延伸变形减小，横向变形增大（扩径），加上没有外端部限制，从而导致前端直径较大。尾端直径较小，这是因为当管坯尾端被顶头开始穿透时，顶头轴向阻力明显下降，这时，处于第二个不稳定过程中的金属较稳定穿孔中的金属所受曳人摩擦力相对为大，轴向阻力相对为小，从而易于轴向延伸变形，所以尾端直径小。在生产实践中我们常观察到毛管前端螺距小，尾端螺距大就是很好的证明。

综上所述，研究穿孔过程应该包括稳定过程和不稳定过程，而不稳定过程对于实现穿孔过程顺利进行是很重要的。虽然三个过程有所不同，但它们都是在同一变形区中变形的，因此，基本的变形规律是相同的。

（3）导板在变形区中的作用

在第Ⅰ区中管坯何时和导板接触，这决定于许多因素，早和导板接触可以早控制横向变形，减小管坯的椭圆度，这对于穿制某些合金钢是很重要的。但过早和导板接触将增大管坯轴向阻力和旋转阻力矩，特别是开始进入第Ⅱ区时，加上顶头的轴向阻力，不易实现二次咬入，甚至轧卡。一般认为，管坯与导板接触最好是在管坯进入变形区30～50 mm的地方，这样对小型机组而言，当取较大的顶头伸出量时，实际上在二次咬入之前管坯和导板通常不接触。在第Ⅱ区导板起着控制横向变形的作用，并获得很大的延伸变形。在Ⅳ区中导板并不起作用，只有这样才能转圆。如果导板参与变形，则毛管容易被导板夹扁。

由穿孔变形过程可看出，穿孔的变形由工具设计（尺寸和形状）和轧机调整参数（轧辊距、导板距、顶头位置等）所决定。例如，顶头位置向前调整，则说明第Ⅰ区减小；轧辊距离减小，整个变形区将加长，相应一些区都有所加长；导板距加大则横向变形增加，纵向变形减小。

3.3　二辊斜轧穿孔过程运动学

热轧无缝钢管生产中广泛采用斜轧穿孔过程。用斜轧过程可将实心管坯穿孔成空心毛管。此外还可用斜轧带芯棒轧管、斜轧均整和斜轧定径，在三辊斜轧系统的无缝钢管机组中几乎各成型工序都是斜轧过程。不管何种斜轧过程，其运动学都是一致的，不管何种斜轧过程，轧件在变形区中均作螺旋运动。

（1）螺旋轧制的速度分析

斜轧穿孔过程中两轧辊同向旋转，管坯送入轧辊后，靠管坯与轧辊之间的摩擦作用带动管坯反向旋转，同时由于轧辊轴线与管坯轴线在垂直平面上有一倾角 α（前进角，如图4.3-8所示）管坯在旋转的同时向轴向移动。故此，在变形

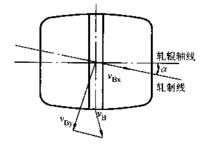


图4.3-8　斜轧速度分析



区中管坯表面上每一点都作螺旋运动，即一面旋转一面前进。

表示螺旋运动的基本参数是：切向运动速度、轴向运动速度和每半转的位移值（即螺距）。首先来讨论两个轴线相交点的速度关系。如图4.3-8所示，设两辊轴线相交处轧辊圆周速度为 v_B，则

$$v_B = \frac{\pi D_B n_B}{60} \tag{4.3-1}$$

轧辊的轴向（沿轧制线）速度分量

$$v_{Bx} = v_B \sin\alpha = \frac{\pi D_B n_B}{60}\sin\alpha \tag{4.3-2}$$

轧辊的切向速度分量

$$v_{By} = v_B \cos\alpha = \frac{\pi D_B n_B}{60}\cos\alpha \tag{4.3-3}$$

式中，D_B 为所讨论截面的轧辊直径，mm；n_B 为轧辊转数，r/min；α 为前进角，(°)。

在轧制过程中，管坯靠轧辊带动作螺旋前进，由于两者速度并非完全相等，一般金属的运动速度小于轧辊速度，即金属和轧辊之间产生滑动，可用滑动系数来表示两者速度差，因此，管坯的速度分量为

轴向前进速度

$$v_{Mx} = v_{Bx}\eta_0 = \frac{\pi D_B n_B}{60}\sin\alpha\eta_0 \tag{4.3-4}$$

切向旋转速度

$$v_{My} = v_{By}\eta_T = \frac{\pi D_B n_B}{60}\cos\alpha\eta_T \tag{4.3-5}$$

式中，η_0，η_T 分别为两轴线相交点截面的轴向和切向滑动系数，一般 η_0 和 η_T 都小于1。

$$\eta_0 = \frac{v_{Mx}}{v_{Bx}} \tag{4.3-6}$$

$$\eta_T = \frac{v_{My}}{v_{By}} \tag{4.3-7}$$

沿变形区管坯任一截面上的速度关系，同样有两个速度分量：

轧辊轴向速度分量

$$v_{Bxx} = v_B \sin\alpha\cos\omega_B = \frac{\pi D_{Bx} n_B}{60}\sin\alpha\cos\omega_B \tag{4.3-8}$$

轧辊切向速度分量

$$v_{Bxy} = \frac{\pi D_{Bx} n_B}{60}(\cos\alpha\cos\omega_B\cos\omega_z - \sin\omega_B\sin\omega_z) \tag{4.3-9}$$

管坯轴向速度分量

$$v_{Mxx} = \frac{\pi D_{Bx} n_B}{60}\sin\alpha\cos\omega_B\,\eta_{0x} \tag{4.3-10}$$

管坯切向速度分量

$$v_{Mxy} = \frac{\pi D_{Bx} n_B}{60}(\cos\alpha\cos\omega_B\cos\omega_z - \sin\omega_B\sin\omega_z)\ \eta_{Tx} \tag{4.3-11}$$

式中，ω_B 为 x 点的轧辊中心角，(°)；ω_z 为 x 点的管坯中心角，(°)；η_{0x} 和 η_{Tx} 为分别表示任一截面上的轴向、切向滑动系数。

$$\eta_{0x} = \frac{v_{Mxx}}{v_{Bxx}} \tag{4.3-12}$$

$$\eta_{Tx} = \frac{v_{Mxy}}{v_{Bxy}} \tag{4.3-13}$$

分析上式可明显看出，变形区任一截面中 D_{Bx}，η_{0x}，η_{Tx}，ω_B 和 ω_z 是变化的，因而这些速度分量也是变化的。

在生产实践中最有实践意义的是毛管出口速度，众所周知，出口速度愈大生产率愈高。为了简化问题和便于工程计算（因为求出 ω_B 和 ω_z 是较困难的，而且其值很小），一般假设轧辊出口速度等于轧辊轴线相交点上的速度，此处的 $\omega_B = \omega_z \approx 0$，其实际误差包括在滑动系数内。在以后的讨论中忽略 ω_B 和 ω_z，因为其值很小。

穿孔毛管出口速度 v_{Mnx}

$$v_{Mnx} = \frac{\pi D_{Bn} n_B}{60}\sin\alpha\eta_{0n} \tag{4.3-14}$$

切向速度为 v_{Mny}

$$v_{Mny} = \frac{\pi D_{Bn} n_B}{60}\cos\alpha\eta_{Tn} \tag{4.3-15}$$

式中，D_{Bn} 为出口截面的轧辊直径，mm；η_{0n}，η_{Tn} 为出口截面的轴向和切向滑动系数。

由于金属在变形区中不是简单地作机械位移，而是伴随着塑性变形，因此，必须应用塑性变形时的体积不变原理来决定变形区中某截面的坯料前进速度 V_{Mxx}。

因为 $F_1 v_{M1.x} = F_2 v_{M2.x} = \cdots = F_x v_{Mx.x} = \cdots = F_n v_{Mn.x}$

所以

$$v_{Mx.x} = \frac{F_n}{F_x}v_{Mn.x} = \frac{F_n}{F_x}\frac{\pi D_{Bn} n_B}{60}\sin\alpha\eta_{0n} \tag{4.3-16}$$

式中，F_1、$F_2\cdots F_x\cdots F_n$ 及 $v_{M1.x}$、$v_{M2.x}\cdots v_{Mx.x}\cdots v_{Mn.x}$ 为在变形区中，轧件在截面1，2，…，x，…，n 处的横截面面积及其相应的速度。

轧件获得 $v_{Mx.y}$ 后产生旋转，其转速可由下式求得：

$$v_{Mx.y} = \frac{\pi d_x n_{M.x}}{60}\varepsilon_x = \frac{\pi D_{Bx} n_B}{60}\cos\alpha\eta_{T.x} \tag{4.3-17}$$

式中，n_{Mx} 为变形区内轧件任一截面的转速，r/min；d_x 为变形区内轧件任一截面的直径，mm；ε_x 为变形区内轧件任一截面的椭圆度系数。

从而得

$$n_{Mx} = \frac{D_{Bx}}{\varepsilon_x d_x}n_B\eta_{Tx} \tag{4.3-18}$$

管坯每半转在轧制线方向上的前进值（螺距）S_x 为

$$S_x = \frac{1}{2}v_{Mx.x}\frac{60}{n_{M.x}} = \frac{\pi}{2}d_x\varepsilon_x\tan\alpha\frac{\eta_{0.x}}{\eta_{T.x}} \tag{4.3-19}$$

或

$$S_x = \frac{\pi}{2}d_x\varepsilon_x\tan\alpha\frac{D_{Bn}}{D_{Bx}}\frac{F_n}{F_x}\frac{\eta_{0.x}}{\eta_{T.x}} \tag{4.3-20}$$

若近似地取 $\eta_{Tx} = \eta_{Tn}$，即任一截面之 η_{Tx} 等于出口截面处切向滑动系数 η_{Tn}，则

$$S_x = \frac{\pi}{2}d_x\varepsilon_x\tan\alpha\frac{D_{Bn}}{D_{Bx}}\frac{F_n}{F_x}\frac{\eta_{0.x}}{\eta_{T.x}} \tag{4.3-21}$$

由上式可看出，S_x 是个变量，它与变形区形状 F_n/F_x 和变形量的分配 d_x/D_{nx} 以及 η_{0x}/η_{Tx} 有关。

（2）金属对轧辊的滑动

纵轧时，一般情况下在变形区中同时有前滑区和后滑区，而斜轧穿孔大多数情况下为后滑，这是由于轴向有顶头阻力的作用，大部分轴向曳入力已用于克服顶头阻力和导板阻力的结果。实验结果指出，在无顶头轧制时虽然变形量很小（金属轴向流动速度变化很小）却存在着前滑区，相反，有顶头穿孔时虽然变形量很大却不存在前滑区，这证明顶头阻力的影响是巨大的。

按力学的基本原则，在穿孔过程中任一瞬间作用在坯料上的全部力应当是平衡的。这些力包括轧辊作用在管坯上的正压力和摩擦力，顶头和导板作用在管坯上的正压力和摩擦力以及由于运动不均匀面产生的惯性力。如果平衡条件在某一瞬间由于某种原因（穿孔过程中许多因素都在变化）遭到破坏，则必然要引起相应的力和速度的变化，而且这种变化要持续到新的力平衡为止。

摩擦力是个重要因素，特别是轧件与轧辊间的摩擦力，摩擦力的大小和方向与金属和工件之间的滑动有着密切的关

系，因为滑动是后滑还是前滑就决定了摩擦力的方向，而且金属和工具之间滑动的大小直接影响着摩擦力的数值。为了简化问题，可以认为，在稳定穿孔过程中管坯运动是均匀的，也就是说没有加速和减速，这就可略去惯性力，把动力平衡问题变为一静力平衡问题。下面我们通过讨论使管坯旋转和轴向前进的静力平衡条件来说明为什么穿孔时为后滑的实质。图 4.3-9 所示，使管坯旋转的力矩平衡条件可用下式表示，因顶头摩擦阻力矩很小，可忽略：

$$2\left(-M_T' + M_T'' - M_P - M_1\right) = 0 \qquad (4.3\text{-}22)$$

式中，M_T'和 M_T''为前滑区和后滑区在切向上的摩擦力矩；M_P 为轧辊正压力产生的阻力矩；M_1 为导板上的摩擦力矩。

由上式可明显看出，只有后滑区中的摩擦力矩为带动坯料旋转的力矩，而其他力矩都是阻止坯料旋转的力矩，因而，在切向上存在着较大的后滑区这是实现管坯旋转的必要条件，如果不存在较大的后滑区则管坯旋转条件是不能建立的（如图 4.3-9 所示）。若采取主动驱动顶头，则增加了一个使管坯旋转的附加力矩，从而有利于旋转条件的建立。管坯旋转条件是实现斜轧穿孔的首要条件，因为只有建立了旋转条件，才能实现管坯轴向移动条件。作用在坯料轴向上力的平衡条件可用下式表示（图 4.3-10 所示）：

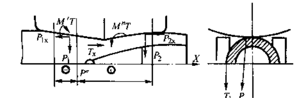


图 4.3-9　坯料旋转受力分析

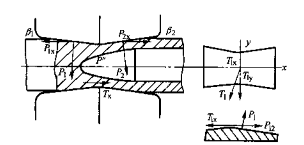


图 4.3-10　作用在坯料轴向力的平衡

$$2\left(P_{2x} - P_{1x}\right) + 2T_x - P'' + 2\left(P_{1x} - T_{1x}\right) = 0 \qquad (4.3\text{-}23)$$

式中，P_{1x}、P_{2x}为轧辊进、出口锥上正压力的轴向分量；T_x 为轧辊上的曳入摩擦力；P_{1x}、T_{1x}为作用在导板上正压力和摩擦力的轴向分量；P''为顶头轴向阻力。

由上式可看出，带动管坯轴向运动是由于 T_x 作用的结果，因为 P_{1x}和 P_{2x}值很小，其他作用力都是阻止金属轴向移动的。T_x 要带动管坯轴向移动，其方向必须和金属运动方向一致。这样，从金属和轧辊速度关系看，轧辊轴向分速度必须大于金属轴向移动速度，即整个变形区为后滑。这就是为什么穿孔过程是后滑的本质规律，因为只有这样穿孔过程中金属的轴向移动条件才能建立。

当轴向阻力增加时，如果穿孔过程还能建立的话，这时要达到新的力的平衡条件，必然是降低管坯轴向移动速度。轴向阻力的增加一方面致使金属和轧辊之间滑动增加，另一方面由于金属轴向移动速度减小，致使每半转螺距值减小（变形量减小），最终导致轴向阻力减小。因而穿孔过程还能继续进行，只是穿孔速度有所降低。但当 T_x 靠速度调节不能大于轴向阻力时或切向摩擦转动力矩不能大于切向阻力矩时，穿孔过程则不能继续进行而轧卡。

显而易见，斜轧穿孔过程中产生全部后滑的实质，主要是由于顶头阻力（主要的）和导板阻力影响的结果。因此要使穿孔过程顺利进行和减小金属和工具之间的滑动，提高穿轧速度，最重要的是减少轴向阻力和切向阻力矩，或增加轴向曳人摩擦力和带动坯料旋转的摩擦力矩。

据此，如果穿孔过程中加一后推力或前张力，以及主动驱动顶头、润滑顶头、取消导板（如三辊穿孔）等都可改变力的平衡条件，有利于建立管坯旋转和轴向移动条件，减小滑移，提高穿孔速度。

加后推力或前张力的平衡方程式为：

$$Q + 2\left(P_{2x} - P_{1x}\right) + 2T_x - P'' + 2\left(P_{1x} - T_{1x}\right) = 0 \qquad (4.3\text{-}24)$$

式中，Q 为穿孔时施加的后推力或前张力。

实验证明，加后推力可显著地减小管坯和工具间的滑动，强化穿孔过程。

（3）影响滑动的因素

总的说来，凡是促进顶头和导板轴向阻力增大，轧辊曳人摩擦力减小的因素，都将促进滑动增大。

1）滑动随着管坯直径的增大而增大。穿孔大直径管坯时，所用顶头长度较短，顶头直径与长度之比较大，顶头母线陡升程度大，从而顶头轴向阻力大，滑动大，滑动系数小。

2）随着穿孔速度的增加以及金属与轧辊之间摩擦系数的下降滑动增加。

3）穿孔温度升高，摩擦系数减小。在热变形的范围内，有两个互相矛盾的影响因素，金属的加热引起氧化物的生成，使摩擦系数增大，随着温度升高，氧化物及金属的粗糙表面变成平滑而柔软，使摩擦系数降低，这是因为高温金属的氧化物的润滑作用及金属粗糙表而变为平滑柔软的作用更突出。然而穿孔温度提高，金属的塑性提高，变形抗力降低，减小了顶头的轴向阻力而造成滑动减少，由于穿孔温度的升高，后者对滑动的影响更大，因此应力求在高温下穿孔。

4）调整参数的影响。顶头位置前移穿孔阻力增大，滑动增大。轧辊距离靠近，管坯直径压缩率增大，变形区变长，曳人摩擦力增大，滑动减小；椭圆度减小，穿孔阻力增大，滑动增大；前进角增大，轧辊的轴向速度分量增大，曳人力增大，滑动减小。

5）工具设计的影响。轧辊人口锥角减小，变形区加长，曳人摩擦力增大，正压力的轴向分量减小。采用较长的顶头，使顶头直径与长度的比值减小，顶头工作锥斜度减小，顶头阻力减小，滑动减小。轧辊直径增大，轧辊同金属的接触面积增大，滑动减小。

3.4　二辊斜轧穿孔过程咬入条件

斜轧穿孔过程存在着两次咬人，第一次是轧件和轧辊刚接触瞬间。由轧辊带动轧件运动而把轧件曳人变形区中，称一次咬人。当管坯进人变形区到和顶头相遇，需要克服顶头的轴向阻力才能继续进人变形区，称为第二次咬人。

一般满足了一次咬人条件并不见得能满足二次咬人条件。在生产实践中我们常观察到二次咬人时由于轴向阻力的作用使前进运动停止而旋转运动还继续着，这就是很好的证明。

（1）管坯旋转条件

斜轧穿孔过程中轧件作螺旋运动，要实现咬人过程必须满足旋转条件和前进条件。

使管坯旋转的条件由下式确定：

$$M_T \geqslant M_P + M_Q + M_i \qquad (4.3\text{-}25)$$



式中，M_T 为使管坯旋转的总力矩，在没有附加旋转力矩的情况下，为使轧辊带动管坯的旋转摩擦力矩；M_P 为由正压力产生的阻止管坯旋转的总力矩，称正压力阻力矩；M_Q 为由推钢机的推入力引起，在管坯后端产生的摩擦阻力矩；M_i 为管坯旋转的惯性矩。

根据上述基本公式，推导出二辊式穿孔机、实现管坯穿孔的旋转条件为

$$f \geqslant \sqrt{\tan^2\beta_1 + 0.5\pi\ (1+i)\ \tan\beta_1 \tan\alpha} \tag{4.3-26}$$

式中，β_1 为轧辊入口锥角，(°)；i 为管坯和轧辊半径之比值，$i = R_M/R_B$；f 为摩擦系数；α 为前进角，(°)。

分析式（4.3-26）可看出，当轧制较小直径管坯（即 i 值较小）时，保证管坯的旋转条件是没有问题的。

(2) 一次咬入条件

为了确定管坯被轧辊曳入的可能性，首先应研究力的平衡条件。当管坯喂到斜放而旋转的轧辊中时，在管坯上作用有一推入力 Q，在管坯和轧辊接触点上产生一个垂直轧辊表面的正压力 P 及摩擦力 T。根据力的平衡条件，在轴向（x 向）所有力的投影和等于零，即

$$Q + 2\ (T_x - P_x)\ = 0 \tag{4.3-27}$$

式中，Q 为推入力；P_x 为一个轧辊上正压力在 x 轴上的投影；T_x 为一个轧辊上摩擦力在 x 轴上的投影。

作用在切点上的正压力垂直于轧辊进口锥的母线。并位于通过切点和轧辊轴线所构成的平面中。这里有两个假设，一是管坯和轧辊为点接触，二是管坯前端断面为圆形，即认为管坯与轧辊接触时没有变形，这显然和实际情况不符，但可近似地这样认为。

为了把金属曳入变形区中，必须有足够的力，而正压力的水平分力则是阻止金属曳入的，推入力是帮助实现曳入的。

上式经过推导和简化则得：

$$\frac{\sin\beta_1}{\sin\alpha} + \sin\omega \leqslant f \tag{4.3-28}$$

式中，ω 为管坯中心角。

上式为斜轧穿孔一次咬入条件公式。热轧的摩擦系数 f 一般取 0.2～0.4。

(3) 二次咬入条件

二次咬入时管坯受力（如图 4.3-11 所示）的平衡条件分两种情况

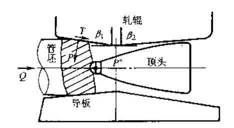


图 4.3-11　二次咬入时的作用力示意

当没有后推力时，

$$2\ (T_x - P_x)\ - P'' = 0 \tag{4.3-29}$$

当有后推力时，

$$2\ (T_x - P_x)\ - P'' + Q = 0 \tag{4.3-30}$$

式中，P''为顶头阻力；Q 为后推力。

由式（4.3-29）可看出，当没有后推力时二次咬入中又增加了一个顶头阻力 P''。因此要满足咬入必须使，

$$2T_x \geqslant 2P_x + P'' \tag{4.3-31}$$

不难看出，T_x 的大小主要和顶头前压缩量有关，顶头前压缩量愈大，则一次咬入到二次咬入间金属和轧辊接触面积愈大，从而 T_x 增大。

为了保证二次咬入可靠，就要有一定的顶头前压缩量。

3.5　斜轧实心圆管坯的应力和变形状态——孔腔形成机理

斜轧实心圆坯时常易出现金属中心破裂现象（形成孔腔）。在顶头前过早地形成孔腔，会造成大量的内折叠缺陷，劣化钢管表面质量，甚至成为废品。因此在穿孔工艺中力求避免过早形成孔腔。这是确定穿孔工艺制度的前提。

(1) 斜轧实心圆管坯的变形和应力状态

1) 斜轧实心圆坯时的变形状态。斜轧实心圆管坯的变形图如图 4.3-12 所示。斜轧穿孔时在两个轧辊作用下，管坯中将产生应力和变形。金属和轧辊接触表面比起不和轧辊接触的金属面积要小得多，因此轧辊对坯料的作用力实际上近似集中负载。

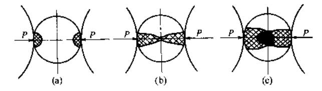


图 4.3-12　轧制实心圆管坯的塑性区分布

按照斜轧圆坯的外力作用情况可将圆管坯划分为两部分：一部分在轧辊的直接作用下，这部分即所谓的直接作用区（图 4.3-12 所示阴影部分）；另一部分在轧辊的间接作用下，这部分被称作间接作用区。根据集中负载的特点，在轧辊的直接作用区应力获得优先发展，也就是说应力很大。随着离开集中负载的作用区，在其余间接作用区应力急剧下降，这是因为应力分布在比接触面大得多的面积上，应力已开始分散。由此，不难看出，塑性变形应首先在擦触面上发展（即表面变形），而向坯料中心方向上的塑性变形逐渐减小。表面变形的金属优先向横向扩展（由圆形断面变成椭圆形断面）并向轴向延伸。由于纵向表面变形，在坯料端部形成漏斗形凹陷。外层变形的金属，由于具有很大的流动速度，将拉辆间接作用区的金属向横向扩展及纵向延伸。由此可见，斜轧圆坯的变形是根不均匀的。

由于斜轧过程是螺旋轧制，从而随着圆坯不断旋转，压缩量在不断增加，塑性变形在不断积累和发展，这样，塑性变形就不断地由接触表面区向里面（间接作用区）渗透，最终在坯料中心将产生塑性变形。

不管塑性变形怎样分布，通过各种实验方法所得到的试验结果多数都证明中心存在着塑性变形，这点对解释斜轧圆坯时产生的中心破裂现象是重要的。

2) 斜轧实心坯时的应力状态。轧制开始在外力作用下沿外力方向上各单元体受到压应力的作用时，在横向（切向）上管坯没有受到其他外力的作用，但如果考虑到金属横向、纵向流动时，轧辊（包括导板）和金属之间将产生阻止金属横向、纵向流动的摩擦力。此外在横向上处于轧辊直接作用区内的单元体还受到其两侧的间接作用区的挤压应力的作用，以及由于表面层金属流动还将受到内层限制外层流动的压应力作用；相反，在中心区将受到外层给予的拉应力。由图 4.3-13 我们可以明显看出，假设在圆管坯的横断面上画上若干个同心圆环，外层圆环由于塑性变形将增大圆周长（横向扩展），而内层圆环由于塑性变形较小，圆周长增加得较小，中心部分塑性变形更小，横向扩展也很小。这样如果



各圆环之间不相联系，则变形后有如图4.3-13所示情况。但实际上金属是一个整体，彼此有着紧密的联系，因此，外层变形金属必然要拉着内层和中心部分金属横向扩展，造成较大的拉应力。

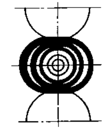


图4.3-13 环向变形图示

同理，在纵向（轴向）外层的变形金属也会对中心部分金属产生拉应力。

这样，在斜轧刚开始，也就是圆坯旋转角还很小时（即旋转数很少），坯料表面层的应力状态是三向压应力，而在坯料中心区的应力状态是一向压、两向拉，即外力方向上为压缩应力，轴向为拉伸应力，横向也是拉伸应力，其数值大小由不均匀变形程度等因素决定。

当坯料不断旋转而深入变形区中，即旋转角已很大时，坯料的应力状态（各向应力的比值）将发生变化，显然表面层的应力状态仍为三向压缩应力状态。但是坯料中心区的应力状态随着坯料的不断旋转前进不断进行积累，不断增加着三个方向上的拉应力成分。横向拉应力对坯料中心破裂起着重要作用。

(2) 斜轧实心圆坯时中心破裂的机理

孔腔（内部疏松）是指斜轧实心工件时产生的纵向内撕裂，工件中心产生的纵向撕裂称为中心孔腔，工件中呈环状的纵向撕裂称环形孔腔。二辊斜轧时产生的为中心孔腔，三辊斜轧时产生的为环形孔腔。

金属材料产生变形或破裂，取决于两者间的相对关系。按位错理论的观点，变形的发展过程是位错不断产生和沿整个滑移面的运动过程，而断裂的发展过程是位错的不断聚积和消失的过程。在整个变形和断裂过程中，两者同时存在。其前提是位错的不断产生和运动，这两个过程发生的必要条件是使金属产生屈服，即应力达到屈服应力的数值。当金属材料产生屈服以后，大量的位错在其运动过程中，由于受到障碍物的阻挡而堆积起来，造成应力集中。这个集中的应力，若被变形过程所松弛，则断裂过程可被抑制，使变形在不断裂的情况下继续进行，此时材料显示出良好的塑性与韧性。反之，若以裂缝的发生与发展过程来松弛，则变形过程被控制，而接着产生断裂。我们研究各种因素对金属塑性（或韧性）的影响，创造条件控制变形过程的有利发展方向，便是我们改善金属材料塑性性能的重要途径。

二辊斜轧实心坯时形成内部疏松（即孔腔）的机理，长期以来一直是斜轧理论研究的一个重要课题。以捷捷林（П.К.Тетерин）为首的一部分学者认为，孔腔形成的根本原因在于斜轧区中发生的高度应变（特别是多余应变），另一部分学者认为在于斜轧区中发生的高度应力集中。在应力观点方面又有以塞别尔（E.Sebel）为代表的切应力理论和以斯米尔诺夫（B.C.Смирнов）为代表的正应力理论的不同争论。直到现在对于孔腔形成的原因还没有一个统一的见解。

从宏观角度讲，疏松的产生和应力应变状态有很大关系，应力状态种类对塑性的影响，从卡尔曼经典的大理石和红砂石试验中可清楚地看出，大理石和红砂石的塑性随静水压力的提高而得到改善。现代研究表明：增加三向压应力中应力球张量的比重，利于提高材料的塑性，减少开裂现象。从提高塑性的角度来看，体应力状态图中三向压应力图最好，两压一拉次之，两拉一压更次之，三向拉应力最不利于塑性变形。因为三向压应力状态图的静水压力值最大，而三向拉应力状态图则没有静水压力。此外，主变形状态图也对塑性有影响，两缩一伸图最好，一缩一伸图次之，一缩两伸的主变形图则最差。

根据我们对40余种工况下的斜轧过程进行计算机数值模拟结果的分析，斜轧过程的变形和应力状态已经完全清楚了；塑性变形从接触表面开始，并随着压缩量不断增加，塑性变形不断向里渗透。等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 在截面内的分布明显的不均匀，各点的等效应变 $\bar{\varepsilon}$ 随着轧制过程是单调递增的；轧件各横截面中心点的轴向应变 ε_z 为拉伸应变，且与第一应变主方向完全重合；而径向应变 ε_r 和横向应变 ε_t 为压缩应变，则以轧件每转半圈为一个周期，呈现规则性交替变化。主变形状态图是两缩一伸。轧件横截面中心点的平均应力 σ_m 始终为拉伸应力，而截面边缘点的平均应力 σ_m 基本为压应力。斜轧实心坯的破裂之所以产生在中心区域而不在表层附近，我们认为有两个原因。一是由于在这两个区域的平均应力 σ_m 的差别很大；在表层附近区域尽管塑性变形达到最大，但该区域的平均应力 σ_m 却是压缩应力，因此该区域的静水压力大，塑性好，不宜开裂；在中心区域塑性变形仍然很大，而平均应力 σ_m 却为拉伸应力，拉伸的平均应力 σ_m 使该区域的塑性差、宜开裂。二是由于在中心区域产生应力集中，当应力集中不能被变形过程所松弛，必将以裂缝的发生与发展过程来松弛，接着产生疏松与破裂。

综合以上的分析，我们对斜轧实心坯中心可能产生疏松和破坏的机理有了新的认识；应力状态对裂纹的扩展有重要影响。静水压力对推迟裂纹的萌生和阻止裂纹的扩展有重要作用，面拉应力作用与其相背。我们认为分析塑性破坏需要综合考虑变形、拉伸应力并配合变形历史和可能叠加的静水压力。

(3) 影响孔腔形成的因素

在生产中更为重要的是如何防止过早形成孔腔。影响管坯中心破裂的决定性的因素可归纳有如下几个方面：

① 变形的不均匀性和纵横变形比。不均匀变形程度主要决定于坯料每半转的压缩量（称为单位压缩量）。纵横变形比表示了金属向纵向和横向的流动程度，即决定于横断面的椭圆度。

② 单位压缩量次数（金属反复压缩的次数）和温度-速度条件。增加单位压缩次数导致金属内应力和反复应力作用增长，当达到总变形的临界值时将引起金属中心破裂，而临界压缩量由温度-速度条件决定，即决定于在斜轧变形过程中金属产生应变硬化和消除应变硬化的程度。

③ 钢的自然塑性。钢的自然塑性由钢的化学成分、金属冶炼质量以及金属组织状态决定，而组织状态又受管坯加热温度和时间的影响。

金属的自然塑性决定着金属在塑性变形过程中产生破坏的倾向，但斜轧穿孔常不用自然塑性指标，而是用穿孔性能来表示坯料中心产生破裂的倾向，穿孔性能好的钢种表示在穿孔过程中不易发生金属中心破裂。穿孔性能和钢的塑性是有关系的，一般情况下塑性愈好穿孔性能也愈好。

1) 变形不均匀性的影响　顶头前压缩量愈大则变形不均匀程度也愈大，导致管坯中心区的切应力和拉应力增加，从面容易促使孔腔形成。一般用临界压缩量来表示对最大压缩量的限制，压缩量小于临界压缩量则不易或不形成孔腔。

顶头前压缩量包括两个可变因素：一是每半转的单位压缩量；二是压缩次数（由咬入到和顶头相遇间的压缩次数）。



这两个因素是相互制约的，在顶头前压缩量为定值的情况下，单位压缩量增加，压缩次数则减少；反之单位压缩量减小压缩次数则增加。

实际生产中增大单位压缩量的办法有二：一是增大前进角；二是增加轧辊入口锥角。生产实践证明，增加前进角可以改善钢的穿孔性能和提高钢管质量。通过实验得出，增加前进角，一方面可使轴向速度加大，螺距值增大，从面单位压缩量加大，压缩次数减少；另一方面由于轴向速度加大导致轴向滑移减小，也使压缩次数减少。因此，虽然每半转压缩量增加，会使变形不均匀增加，但由于压缩次数减少，反面会导致切应力和拉应力以及反复应力的作用减小，最终使孔腔形成倾向减小，有利于提高毛管质量。

可是采取增大入口锥角的办法来增大单位压缩量往往会得到相反的结果。生产实践证明，减小入口锥角反面会改善钢的穿孔性能，减小形成孔腔的倾向。这是因为入口锥角大小和顶头前压缩量有着密切的联系，一方面轧辊入口锥角减小，每半转单位压缩量减少，不均匀变形减小，对防止孔腔形成有利。但压缩次数有所增加，对防止孔腔形成不利。另一方面即更为重要的方面是，采用小的入口锥角可以减小顶头前压缩量，面当采取大的轧辊入口锥角情况下往往以小的顶头前压缩量进行穿孔是很困难的，因为大锥角下咬入情况很坏，这样就不得不增加顶头前压缩量，反面增加了压缩次数。综合起来考虑，增大轧辊入口锥角并不是有利的。

由上述可得出，在一般情况下采用较大的前进角和较小的轧辊入口锥角都可以提高钢的穿孔性能，减小孔腔形成几率，有利于改善毛管的内表面质量。

2）纵横变形（椭圆度）的影响。二辊斜轧过程中在管坯横断面上存在着很大的不均匀变形，而椭圆度愈大，则不均匀变形也愈大。按照体积不变定律可知，椭圆度愈大（横变形愈大）则纵向变形愈减小。横变形增大将导致管坯中心区的横向拉应力、切应力以及反复应力作用增加，特别是横向拉应力。面横向拉应力对孔腔形成起着决定性的作用，从面在斜轧中采取过大的椭圆度对产品质量是不利的。

3）压缩次数的影响。单位压缩量的压缩次数在下列情况下常增加：当提高总的直径压缩量面单位压缩量不变时，当总压缩量一定面增加变形区长度时（如减小轧辊入口锥角和前进角时）以及金属轴向滑移增加时。

生产实践和科学试验确认，压缩次数增加导致孔腔形成倾向的增加。关于这一生产实际现象在理论上有下列几种看法：

① 拉、压、切反复交变应力的影响。随着压缩次数的增加，反复交变应力作用次数也增加。

② 管坯中心区应力状态的影响。随着压缩次数的增加，坯料中心应力状态中占优势的拉伸应力增加。

③ 纵横变形比的影响。随着变形区长度的加长，压缩次数增加，椭圆度增加，即横向变形加大，纵向变形减少。

可以认为上述的影响因素都是存在的，下面分别加以讨论。

① 交变应力的影响。交变应力的作用，导致金属强度的降低，从面容易造成坯料中心破裂。为了减少压缩次数可从两个方面着手：一是增加前进角；二是减小轴向滑移。实践证明，前进角增加时孔腔形成倾向减小。

② 轧制温度 - 速度条件的影响。以残余应力形式存在的拉伸应力，随着压缩次数的增加，不断积累增大。这一因素实际上是温度 - 速度条件的影响。因为在热塑性加工过程中存在着应变硬化和消除应变硬化两种相互矛盾的过程。前一种过程可以导致残余应力的积累，后一种过程可以消除这种应力积累。

③ 单位压缩量 - 定时变形区长度的影响。总压缩量、压缩次数和变形区长度的增加，导致轧件椭圆度增加，即横向变形增加。在单位压缩量为定值的情况下，随着变形区长度的增加（总压缩量的影响），轧件的椭圆度增加，从而横向拉应力增加，导致孔腔形成倾向增加。

4）金属的塑性的影响。金属的自然塑性对穿孔性能有着很大的影响。一般来说，塑性愈低的金属，穿孔性能也愈差，也愈易产生中心破裂，这是很容易理解的。因为通常影响金属自然塑性的因素都直接影响穿孔性能，各钢种的穿孔性能不同，就源于其原始塑性不同。高合金钢一般比碳钢的穿孔性能差，这是因为高合金钢中含有特殊合金元素，导致金属的塑性变差。

加热制度对钢的穿孔性能的影响，主要指在加热时要保证具有良好的加工组织，有较小的热应力以及防止过热和过烧。加热温度和穿孔性能的关系，应由实验（热扭转试验和穿孔性能试验）确定。

加热速度的影响，主要由被加热金属导热性好坏决定。对于具有低导热性的钢种（特别是在 900℃ 以前），不应当采取过大的加热速度，否则会造成过大的热应力，当达到一定值后金属内易产生内裂，使金属塑性下降，穿孔性能降低。但对于加热小直径管坯（一般钢种），这方面影响不很大。

（4）孔腔对穿孔工艺的影响

人们对斜轧过程中的孔腔形成现象的认识有过重大的改变。曼乃斯曼兄弟根据孔腔形成原理发明了二辊斜轧穿孔机。开始曾试图利用孔腔形成的原理，不用顶头进行穿孔，但因毛管内孔小、形状不规整和内壁粗糙等原因面不能实用。于是在穿孔出口变形区放置顶头，穿孔时管坯先在入口锥内经受较大的直径压缩率，预先产生很大的孔腔，然后在轧辊出口锥内用顶头进行减壁、扩内孔和平整表面面得到厚壁毛管。为了达到预先形成孔腔的目的，其操作工艺按顶头前压缩率 ε_{dq} 大于实现二次咬入所需要的顶头前最小压缩率 ε_{min}，同时大于临界压缩率 ε_{li}，即 $\varepsilon_{min} < \varepsilon_{dq} > \varepsilon_{li}$ 进行，并采用大压缩率（$\varepsilon_{dq} = \varepsilon = 20\% \sim 30\%$）、大辊而锥角（$\beta_1 > 4°30'$）、大孔型椭圆度系数（$\xi \geqslant 1.2$）、小前进角（$\alpha = 3° \sim 6°$）、粗短顶头和小的顶头前伸量等工艺参数。

随着各工业部门的发展对热轧无缝钢管的质量和品种提出了更新的要求，上述的穿孔工艺已无法适应，特别是在穿制合金钢管时更是如此。经试验研究查明，预先形成孔腔是毛管出现内折叠缺陷的根本原面，因面建立了 $\varepsilon_{min} < \varepsilon_{dq} < \varepsilon_{li}$ 的新操作工艺，以确保顶头前不会预先形成孔腔，但仍利用孔腔形成过程中第一阶段使管坯中心疏松，以减少顶头鼻都的单位压力，便于穿正和提高顶头寿命。为此操作中果用较小的压缩率（轧坯：ε 不大于 15 ~ 16%、ε_{dq} 不大于 8%，高塑性钢种不大于 10%；钢锭：$\varepsilon = 5 \sim 6\%$）、小入口锥角 $\beta_1 > 2°30' \sim 4°30'$，小椭圆度系数 $\xi = 1.09 \sim 1.15$、大前进角 $\alpha = 6° \sim 12°$，顶头位置前伸（C 值为正）以及使用细长顶头。顶头既起加工管壁作用，又起穿孔作用。这种穿孔工艺改革，已经改变了曼乃斯曼穿孔法的基本原理，孔腔形成已不是斜轧穿孔的必要条件，相反人们已经认为孔腔形成现象成为曼乃斯曼穿孔法中对提高毛管质量和扩大钢种范围的致命伤。

（5）防止过早产生孔腔的措施

为了满足近代工业发展对无缝钢管质量高级化、品种多样化和采用连铸坯直接穿孔、轧管的要求，近十年来轧钢工作者探索用各种方法，乃至打破以往关于顶头前管坯中心如无一定的疏松区则无法实现穿孔的推测，力求从根

本上改变斜轧穿孔的应力状态条件，PPM推轧穿孔的出现就是一例。在二辊斜轧穿孔机上，为了防止过早产生孔腔，根据孔腔形成的综合理论，主要采取各种措施来减轻不均匀变形，限制金属横向变形，发展纵向变形，减少轧件在穿孔准备区内的被压缩次数和提高管坯质量等。目前采用的主要措施有：

1）采用大前进角。大前进角可显著提高临界压缩率 ε_{ij}，并提高实际穿孔速度。根据试验和从金属疲劳强度分析，大前进角使 ε_{ij} 提高主要是由于：a）减轻变形不均匀性，这一点在 $\alpha>12°$ 时才有明显作用；b）减小轧件在顶头前受反复应力的循环次数，使不均匀变形引起的拉应力减小，金属保持较高的疲劳强度。国外从1971年开始采用大达15°~17°前进角。

2）采用较小的孔型椭圆度系数 ξ。对于采用导板或导辊的穿孔机，取较小的 ξ 值可减小横向变形和由此而产生的横向拉应力值，可以提高 ε_{ij} 值。

3）采用小的轧辊入口锥角 β_1。在小的前进角条件下（$\alpha>12°$），采用小的 β_1 值是合理的。据文献介绍，在90穿孔机上对 $\phi80$ 的Cr18Ni10Ti钢进行试验（$\alpha\leqslant12°$），当 $\beta_1=2°$ 时，单位压缩量为1.4%，轧件经压缩9次仍未出现中心撕裂，而 $\beta_1=6°$ 时，单位压缩率为3.5%左右，平均压缩5.5次即产生中心撕裂。其原因是：a）试验指出在单位压缩量小于6%时，增加单位压缩率不但不能减轻不均匀变形，反而使非接触变形区的楔劈作用增加，使横向拉应力增加。而一般斜轧穿孔的单位压缩率不大于3.8%，因此，采用小的 β_1 是合理的。b）小的 β_1 角可以减小咬入所需的 ε_{min} 值，为采用较小的 ε_{dq} 创造条件。

试验结果表明，在大前进角条件下（$\alpha>15°$），采用大的 β_1 角有利于提高 ε_{ij} 值，这是因为在这条件下单位压缩率已大于6%，管坯中心已产生较大的塑变形，β_1 角增大将使单位压缩率增大而不均匀变形减小的结果。但过大的 β_1 角会使变形区太短而破坏其过程的稳定性，故综合考虑仍应采用较小的 β_1 值。

4）采用主动导盘（狄塞尔穿孔机）。实验数据表明，在 $\alpha<15°$ 的条件下，采用主动导盘或导盘与导板组合导向工具，可显著提高 ε_{ij}。当 $\alpha>21°$ 时，用各种导向工具所得的 ε_{ij} 基本相同。用主动导盘可提高 ε_{ij} 原因可归纳为：a）导盘对管坯直径压缩，可减小横向拉应力；b）导盘抑制轧件椭圆度有利金属纵向变形的发展；c）可提高轴向滑动系数，提高穿孔速度，减少管坯在顶头前的反复压缩次数。因此在狄塞尔穿孔机上可穿制连铸坯。

5）顶推力穿孔。在穿孔过程中在管坯尾端施加顶推力 Q，有助于提高穿孔效率，减少顶头前管坯的压缩次数，并可加大轴向压应力作用区和减小咬入所需的 ε_{min}，故可提高 ε_{ij}，但顶推力 Q 过大会使横向变形显著发展，促使孔腔的形成。

6）采用主动顶杆与轧辊辊面压花。这些措施均有利提高轴向滑动系数和发展纵向变形，而提高 ε_{ij} 值。

7）提高管坯质量。管坯自身的质量对 ε_{ij} 值影响很大，例如1Cr19Ni11Si4AlTi不锈钢的临界压缩率 ε_{dq}，用电渣重熔时为11%，普通电炉冶炼时为7%。

3.6 二辊斜轧穿孔作用力与力矩

在斜轧穿孔过程中参与金属变形的工具有轧辊、导板和顶头。斜轧穿孔中的作用力就是金属在变形时作用在工具上的力，因此穿孔的作用力不外乎是作用在轧辊、导板和顶头上的力。

斜轧穿孔的作用力是轧机设计和生产的原始数据，因而精确地确定其值对轧机设计和拟定工艺都很重要。由于力参数确定不够精确往往使得设备强度设计得过大而造成浪费，或设计得过分薄弱而造成设备事故，甚至不能正常进行生产。在生产中常会遇到这样的问题，因此精确地确定穿孔时力参数是设计和生产都有待解决的问题。

目前，对于斜轧穿孔作用力的研究很不充分，而实际测定资料也不多。关于计算穿孔时作用力的公式在国外文献资料上发表了一些，但都不能应用，因为和实际差别太大。近年来为了实际工程的应用，多采用实际测定资料或在实际测定资料的基础上总结出的半经验公式。

（1）斜轧穿孔的力参数

斜轧穿孔的力参数包括：金属对轧辊的轧制压力、金属对导板的作用力和顶头轴向阻力等。

1）轧制压力。金属对轧辊的轧制压力由下式确定

$$P=p_cF \tag{4.3-32}$$

式中，P 为轧制压力；p_c 为平均单位压力；F 为金属和轧辊的接触面积。

金属和轧辊间摩擦力为：

$$T=Pf \tag{4.3-33}$$

式中，f 为金属和轧辊间摩擦系数。

2）轴向阻力。轴向阻力包含有两个方面，一是作用在顶头鼻部上的力，一是作用在整个顶头上的轴向力。

① 作用在顶头鼻部上的力。研究作用在顶头鼻部上的力对于了解顶头前管坯中心的应力状态以及分析顶头鼻部损坏的原因很重要。生产中影响顶头鼻部上力的因素主要有：穿孔速度、顶头前压缩量以及轧辊入口锥角等。如果平均单位压力 p_H 对金属屈服极限 σ_s 的比值用 n_H 表示，即 $n_H=p_H/\sigma_s$，n_H 称为顶头前应力状态系数，n_H 一般取为0.5~0.6。

作用在顶头鼻部上的平均单位压力等于：

$$p_H=n_H\sigma_s \tag{4.3-34}$$

作用在顶头鼻部上的总压力 P_H 等于

$$P_H=\pi r_H^2 n_H\sigma_s \tag{4.3-35}$$

式中，r_H 为顶头鼻部的半径。

② 作用在整个顶头上的力（轴向力 P''）。确定斜轧穿孔时轴向力的大小对于生产有很重要的意义，轴向力即为作用在顶杆上的压力。轴向力大小直接影响着顶杆强度及工作的稳定性，如图4.3-14所示。此外，轴向力大小也直接影响着毛管轴向前进速度，而轴向前进速度对产品质量和产量都有很大影响，从而精确地计算出轴向力这是需要解决的问题。但对穿孔时轴向力的研究却较少，虽然有些计算公式，由于和实际出入较大，不能很好应用。

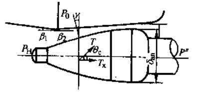


图4.3-14 作用在顶头上的力

确定轴向力的基本公式为：

$$P''=P_H+2P_0(\cos\gamma+f\cos\gamma) \tag{4.3-36}$$

式中，P''、P_H 为作用在顶头上和顶头鼻部上的轴向力；P_0 为作用在顶头上的正压力；γ 为顶头母线的切线角。

如果考虑到毛管呈螺旋运动，则金属同顶头接触摩擦力的方向不平行于穿孔轴线，则接触摩擦力的轴向分力为

$$T_x=P_0f\cos\gamma\cos\theta_c \tag{4.3-37}$$



式中，θ_c 为金属与顶头间摩擦力的方向角（图 4.3-14）。实测结果 $\theta_c = 28° \sim 53°$，当延伸系数大或顶头前伸量大时取大值，即：

$$P'' = P_H + 2P_0（\cos\gamma + f\cos\gamma\cos\theta_c） \qquad (4.3\text{-}38)$$

实际上，确定轴向力多用实测资料，根据 P''/P 比值来决定 P''。

3）导板上的作用力。导板是斜轧穿孔毛管时的主要变形工具之一，因而金属作用在导板上的压力是斜轧穿孔力参数之一。目前很少有人在这方面进行研究，实际计算中往往是被忽略的。一般垂直的（导板架上）导板力 R 与轧辊上压力 P 的比值在各种轧制条件下波动在 0.13～0.27 范围内，即：

$$R/P = 0.13 \sim 0.27$$

另有文献资料介绍为

$$R/P = 0.15 \sim 0.3。$$

导板对轧件的轴向阻力为

$$E_x = Rf_L \qquad (4.3\text{-}39)$$

式中，f_L 为轧件与导板之间的摩擦系数，一般取为 0.5。

（2）斜轧穿孔受力分析及力矩计算

为了确定作用在轧辊上力的方向，首先研究没有顶头和导板的简单轧制情况。这时作用在轴向方向上没有任何力，因此，作用在轧辊上的压力和摩擦力的合力应该在垂直于穿孔轴线的平面内并通过管坯的中心。如图 4.3-15 所示。

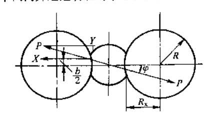


图 4.3-15　二辊斜轧受力示意

当有顶头和导板存在时则产生有轴向力 T（设计后推力），这时穿孔受力分析如图 4.3-16 所示。

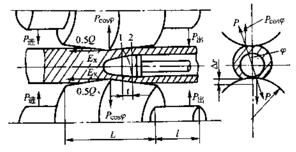


图 4.3-16　二辊穿孔受力分析

对于两辊穿孔机每个轧辊上所承受的轴向力为 $T/2$，而

$$T = P'' + 2E_x \qquad (4.3\text{-}40)$$

假设在稳定穿孔过程中管坯运动是均匀的，也就是说没有加速和减速。因此，作用在金属上的所有力的几何和应等于零。把力投影到穿孔机轧辊的三个相互垂直轴上得到。

投影在 x 轴上所有的作用力 X 为：

$$X = P\cos\varphi \qquad (4.3\text{-}41)$$

式中，φ 为轧制压力 P 与 $x-x$ 轴之间的夹角。

投影在 y 轴上所有的作用力 Y 为：

$$Y = P\sin\varphi\cos\alpha + \frac{T}{2}\sin\alpha \qquad (4.3\text{-}42)$$

投影在 z 轴上所有的作用力 Z 为：

$$Z = T\cos\alpha - P\sin\varphi\sin\alpha \qquad (4.3\text{-}43)$$

力 X 与 Y 构成使轧辊旋转所需的力矩。力 Z 造成对顶杆和导板的轴向力。

为了确定轧辊旋转力矩，假设合力作用在金属和轧辊接触面宽度的中间，力臂 $e = \frac{b_c}{2}$。如果把 e 表示成接触面宽度 b_c 的函数，则 $e = \psi b_c$，当 $e = \frac{b_c}{2}$ 时，这时 $\psi = 0.5$。但在有顶头穿孔时由于在顶头上轧制阶段轧件有很大的椭圆度，从而变形时存在着减径区（塑性弯曲变形）和压缩区两个部分，而且两个区中单位压力差别很大。比较正确的应该取 $\psi = 0.4 \sim 0.45$，接触面宽度采取沿变形区长度各断面的平均值。

沿轧辊长度上的合力作用点，对于确定圆柱形轧辊的旋转力矩来说，合力作用点取在轧辊长度上任何地方完全相同。对于斜轧机轧辊由于沿辊身长度上轧辊直径变化很小，因此对于决定旋转力矩也没有很大的影响。一般沿轧辊辊身长度上合力作用点取在轧辊压缩带中。

这样，所需的旋转力矩等于：

$$M = Xe + YR_x \qquad (4.3\text{-}44)$$

式中，$R_x = \sqrt{R_n^2 - e^2}$，R_n 为轧辊压缩带处轧辊半径。

将 x 和 y 轴上的力代入旋转力矩公式中，得到：

$$M = P（e\cos\varphi + R_x\sin\varphi\cos\alpha） + R_x\left(\frac{P''}{2} + E_x\right)\sin\alpha \qquad (4.3\text{-}45)$$

按此公式求出的轧制力矩小于实际所需的轧制力矩，这是因为没有考虑导板作用在金属上的旋转阻力矩以及带动顶头旋转所需力矩。

导板是参加金属变形的工具之一，而且导板力是较大的，从面对导板阻力矩应予考虑。为了实际工程计算，可在上述公式基础上附加一个导板旋转阻力矩，即

$$M = P（e\cos\varphi + R_x\sin\varphi\cos\alpha） + R_x\left(\frac{P''}{2} + E_x\right)\sin\alpha + （0.13 \sim 0.27） Pf_L\cos\alpha\,\frac{A}{2} \qquad (4.3\text{-}46)$$

式中，A 为压缩带间导板间距。

对于两个轧辊所需的力矩为 $2M$，所需功率（kW）为

$$N = \frac{(2M + M_T)\ \omega}{\eta} \qquad (4.3\text{-}47)$$

式中，M 为传动一个轧辊所需的力矩；M_T 为为总的（两个轧辊）摩擦力矩；ω 为轧辊角速度（1/s）；

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \qquad (4.3\text{-}48)$$

n 为轧辊转数（r/min）；η 为传动效率，一般可取 0.88～0.92。

摩擦力矩可按下式确定（克服辊颈上的摩擦力矩）：

$$M_T = 4 \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{d_T}{2} f = Pd_Tf \qquad (4.3\text{-}49)$$

式中，f 为摩擦系数。滚动轴承可取 $f = 0.004 \sim 0.006$，滑动轴承可取 $f = 0.08 \sim 0.1$；d_T 为轴承摩擦圆直径。滚珠轴承为滚子滚动的圆周直径，滑动轴承等于轧辊辊颈直径。

从管坯咬入到穿孔结束过程中功率是变化的，上式所计算的功率为穿孔稳定过程所需要的功率。

3.7　三辊斜轧穿孔

对于三辊斜轧穿孔机的研究早就开始，但直到 1965 年才投产了一台工业性的三辊斜轧穿孔机，这是无缝钢管生产中的一项重大发展。三辊穿孔除了具有斜轧穿孔方法效率高、生产灵活和穿孔坯料长等特点外，还具备很多独特的优点。其中最主要的一点是三辊穿孔时的有利的应力状态，完全排除了二辊穿孔时产生中心破裂的可能性，因此可以生产



过去二辊穿孔机难以或者不能生产的合金钢，并且还可以用连铸管坯进行穿孔。这样，三辊穿孔就为扩大产品品种和降低钢管生产成本创造了条件。正因为如此，这种穿孔方法一经试验成功，投入工业性生产就立即得到世界各国的重视。

三辊穿孔机的变形过程和两辊穿孔机变形过程没有原则的区别。变形区同样由四个区所组成。而不同之点是取消了导板，由三个轧辊构成封闭变形区，轧辊形状、顶头形状和两辊轧机的大体相同。但三辊穿孔的变形特点和两辊的有所区别，其主要有：

1）由于三个轧辊呈等边三角形布置，因而在变形区中管坯横断面上的椭圆度小。

2）由于三个轧辊都是驱动的，同时仅存在顶头的轴向阻力，从而运动学条件较两辊有利。

3）在穿孔准备区由于管坯始终受三个方向压缩，加上椭圆度小，一般在坯料中心不易产生中心破裂，即不易形成孔腔，这是三辊穿孔机最突出的优点，因此三辊穿孔机穿出的毛管质量好。

4）具有三角形变形特征：二辊穿孔过程的横断面变形是由圆变椭圆再规圆的过程。面三辊穿孔过程是由圆到圆三角形再规圆的过程。管坯自咬入开始，则横断面开始出现三角形，随着压缩量增加则三角形趋势增大，到顶头均整段为止，由于三角形内周边大于顶头圆周长，因此在顶头均整段三角形开始逐渐规圆，直到脱离开顶头在转圆区中最终转圆。一般三角形随着 D/S 比值增加而增大。

这种三角形变形特点，常反映在毛管尾部变形。在穿孔管坯尾端时由于前进曳入力迅速下降，后滑加大，而引起尾端剧烈地横向辗轧，当 $D/S>11$ 时，回转断面刚性变小，同时由于没有导板和后刚端的限制，金属很容易挤入辊缝中，而卡在辊缝中形成三角形喇叭口。而且 D/S 值越大形成后端三角形也越大。

由于尾端三角形的存在，在三辊穿孔机上常常不能穿制薄壁毛管，这是三辊穿孔的问题之一。目前三辊穿孔机已在新建的连轧管机组和三辊轧管机组中使用。

关于三辊穿孔不易形成孔腔的机理，一般有如下看法。

有的认为，在两辊穿孔机上轧制圆管坯时，由于存在着压应力和拉应力交替作用，所以容易形成孔腔。而三辊穿孔时仅存在压缩应力，没有拉应力，所以不易形成孔腔。也有的认为，在二辊穿孔机上穿孔管坯时，管坯中心受外力的相互剪切作用，而造成中心破裂，其力学分析图 4.3-17 所示。在轧辊入口锥管坯受轧辊压缩而产生轧制压力 P_1 和 P_2，轧辊旋转对管坯产生摩擦力 F_1 和 F_2，由于两个轧辊速度相等，所以合力只 R_1 和 R_2 在理论上应该相等，相互平行且

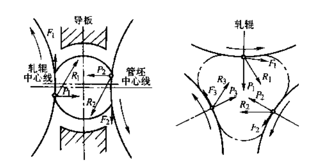


图 4.3-17 斜轧穿孔力学分析图示

方向相反。由于合力 R_1 和 R_2 的相互剪切作用，将管坯中心区连续地撕裂而形成孔腔。而在三辊穿孔情况下合力 R_1、R_2 和 R_3 永远不能平行，从而坯料中心不可能产生剪切力。

以上两种分析都是粗浅的，但从中可以得到启示，三辊穿孔和两辊穿孔变形的不同点，就在于横向变形有显著的差异。尽管在三辊穿孔机上还可能存在金属横向扩展，但由于三个轧辊彼此成 120°角安放，轧辊从三个方向上来阻止金属横向流动，所以横向扩展是很小的，这样由于横向扩展所引起的横向拉应力也大为减小，在三个轧辊共同压缩下，坯料在径向和横向都受压应力作用，因此在三辊穿孔机上径向应力与横向应力之差比二辊轧机要小得多。这就使剪应力难于超过屈服限，同时由于横向不存在拉应力，所以中心破裂就不宜产生。

不过，三辊穿孔时金属破裂可能发生在一个环形区中，这个环形区相当于滑移线最密集区（如图 4.3-18 所示）。有资料介绍，在某些轧制条件下，压下量仅 23% 就产生了环形的破裂和起层现象。因此，作用在管坯环形区域的最大拉应力，在一定条件下也可能引起环形分层。随着前进角的减小，轧辊圆周速度的增加以及轧制温度的降低，产生这种分层现象的倾向也有所增加。

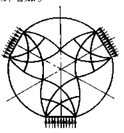


图 4.3-18 三辊斜轧滑移线示意

比较二辊和三辊穿孔时中心区的变形和应力状态其不同点在于：在三辊穿孔时金属的变形状态为两向压缩一向延伸，应力状态为两向压缩一向拉伸（轴向）。在二辊穿孔时金属的变形状态为一向压缩两向延伸，应力状态为一向压缩两向拉伸（甚至三向拉伸）。

三辊斜轧穿孔时的运动学、咬入条件、轧制力和工具设计等的分析和计算方法与二辊斜轧相同（涉及轧辊数目时应 $n=3$）。

由于三辊穿孔机有三个主动轧辊和取消了固定导板，因此与二辊式穿孔相比，至少还有如下差异：

增大穿孔机的前进角是提高生产能力和改善毛管质量的有效措施，而在这方面，三辊穿孔要比二辊穿孔具有更大的潜力。试验研究的结果表明，在三辊穿孔机上前进角增大到 17°可以保证可靠地咬入，即使再加大到 20°～22°也不致破坏咬入条件。由于三辊穿孔机较两辊穿孔机轴向滑动小，轴向滑动系数较两辊大 15%～20%甚至更大，穿孔效率可由二辊穿孔的 70%～80%提高到 90%～95%，从而可以大大缩短穿孔时间。这不仅对提高生产能力有利，而且对延长顶头寿命也有很大意义。此外，由于三辊穿孔机取消了导板，表面划伤减少，轧机调整也大为简化，事故处理也比较容易。

应当指出，在三辊穿孔过程中，由于比二辊穿孔时的二次咬入力大，金属滑动减小，管坯每转的送进量加大以及金属同顶头接触面积增大等原因，使穿孔时的轴向推力比二辊的大。这就增加了顶头和顶杆的负荷，为此需改进顶头材质和孔型，改进定心辊装置等。另外，三辊穿孔机不适于生产管壁较薄的毛管。

在管坯压下量相同的情况下，三辊穿孔机的顶头鼻部接触应力要比二辊的大 18%～22%。作用在顶头上的轴向压力，也就是有效的轴向送进力，三辊比二辊大 25%～28%。

3.8 推轧穿孔机

为了成功地采用连铸坯轧管，必须在连铸技术及轧管技术两方面作出相应的改进，因为轧管生产的一道重要的工序是穿孔，而在斜轧穿孔过程中管坯承受交替的拉伸应力和压应力。因此，往往在管坯的疏松、发裂、夹杂缺陷处形成裂纹，进而在成品管上造成离层、重皮等缺陷。所以，既需要改进连铸技术以提高管坯质量，又需要改进轧管技术以降低对管坯的要求，这两个方面相辅相成，缺一不可。瑞士人卡尔莫斯（Albert H.Calmes）从 1957 年开始试验研究，在进行大量试验的基础上发展了一种崭新的穿孔工艺即推轧穿孔法，称 PPM（Press Piercing Method）法，它可以高效能地穿轧廉价的连铸方坯。PPM 法于 1977 年正式投入工业生产。

图 4.3-19 是推轧穿孔工艺示意图，其原理是用推钢机将经过加热的连铸方坯推入带圆孔型的一般二辊式纵轧机中，其后台有一固定的顶杆，顶杆前端的顶头伸入到轧辊孔型中。它是由轧辊上的圆孔型和由顶杆支承在孔型中的穿孔顶头构成一个环形孔型。穿孔轧制时，推料机的轴向推力和轧辊的径向轧制力同时作用在方坯上，使其通过出轧辊孔型和顶头所组成的穿孔变形区以后穿孔成空心坯。在变形过程中只出现压应力，基本上消除了拉伸应力、剪切应力和连续滑动现象，故穿孔后的连铸坯的金属组织大大改善，也为穿轧低塑性高变形抗力的高合金钢创造了条件。

如图 4.3-19 所示，经过加热的方坯 BL 在消除氧化铁皮和定型后，被送至压力穿孔机的受料槽内，并处于液压推钢机 AP 和轧机机架间。液压推钢机 AP 将经过热定心的方坯推入一个坚固的、公差很小的方形入口导套 IG 内，使方坯同时和穿孔顶头 PP 和轧辊 RG 相遇，并在整个穿孔过程中维持恒定的推力。具有圆孔型的轧辊对方坯施以径向的变形力，这种变形力起初是作用在方坯的四个角上，然后作用在它圆形的外表面上。当空心坯 HB 由轧辊孔型中轧出时，立即进入坚固的配合得很紧密的出口导套 OG。导环 CG 在穿孔开始时位于顶杆 PB 的前端，而当空心坯进入出口导套 OG 时，它与导环 CG 相遇，并推动导环 CG 前进而空心坯本身逐渐起到定心的作用。因此，只要正确地调整入口导套 IG，轧辊 RG 和出口导套 OG 即可保证方坯、顶头与顶杆三者的中心线在同一直线上，故压力穿孔后，空心坯壁厚比较均匀。当穿孔操作将要结束时，液压推钢机的柱塞杆 IP 自动停止前进，而推钢机外环继续前进，直至与顶头相遇为止，此时方坯后部的穿孔全靠径向轧制力来完成。方坯穿孔后，打开锁门，水冷顶杆由空心坯内抽出，其动作和斜轧穿孔机是相同的。

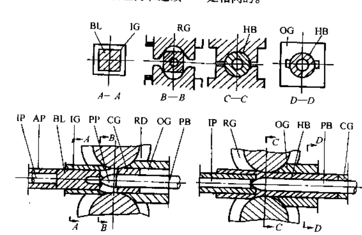


图 4.3-19 推轧穿孔工艺（PPM）原理示意（符号示意见正文）

推轧穿孔的优点：

1）穿孔过程中坯料中心处于全向压应力状态和外表面主要承受径向压应力，并消除了二辊斜轧穿孔时出现的那种不希望的滑动现象，可采用廉价的连铸方坯，为显著降低无缝管成本创造了条件。

2）穿孔过程中主要是坯料中心部分的金属变形，使中心粗大而疏松的组织得到更好的加工而致密化。同时在压应力作用下，毛管内外表面不产生裂纹，故毛管表面质量较好。

3）功率和工具消耗少。根据实测资料，相同的毛管，推轧穿孔的单位能耗仅为二辊斜轧穿孔的 20%左右。推轧穿孔的顶头平均单位轴向力仅为压力穿孔的 50%左右，因而工具消耗比压力穿孔少。

4）由于应力状态条件好，为穿制低塑性、高变形抗力的高合金钢创造了有利条件。

5）生产率可达 2 根/min，比压力穿孔大的多。

从初步工业实践看，推轧穿孔存在两个主要问题。一是穿孔的延伸系数小，穿孔后必须配备 1～2 个延伸机，穿孔前还需有辊式定型机，因此与推轧穿孔有关的设备投资大；二是毛管壁厚不均严重，横向壁厚不均高达 30%，经两次延伸后才有可能控制在 8%以下。

近年来，炼钢和连铸技术的发展，旋转连铸法的应用，已使连铸圆坯表面质量大为改善。三辊斜轧穿孔的出现和二辊斜轧穿孔技术的发展，如狄塞尔（Diescher）穿孔机的应用等，使连铸圆坯在斜轧穿孔中业已应用，并在工业生产中已开始用普通二辊斜轧穿孔机穿制连铸圆坯。由此推轧穿孔在钢管工业生产中的应用，既取决于其本身的完善，又取决于圆坯的连铸技术和其他穿孔技术的发展。

3.9 导盘式二辊斜轧穿孔机——Diescher 穿孔机

直至 Diescher 穿孔机出现以前，高效能的穿孔机的共同特点是：交流电机传动，设有固定导板，后台设有止推小车，不可变速的交流传动使轧辊的圆周速度最大仅能达 6 m/s，再加上喂进效率差，仅为 0.8，因此空心坯长度不大于8 m，而在轧出端的操作过程中又需约 10 s 的停顿时间。因此 Stiefel 穿孔机的生产率仅为 3 根/min，即每分钟穿轧 24 m穿孔坯。曼内斯曼钢管公司自 1970 年开始研制开发旨在超越上述极限的、以主动旋转的导盘代替固定导板的二辊斜轧穿孔机——Diescher 穿孔机，第一台 Diescher 穿孔机在 1972 年投产。Diescher 穿孔机的主要特征是：①轧辊上下布置，Diescher 导盘则水平布置，如图 4.3-20 所示。②每一个轧辊由 1 台水平安装的直流电机传动；③在轧出端设有新颖



的顶杆更换系统，穿孔过程完毕后带有顶头和套有穿孔坯的顶杆横移，离开轧制中心线，然后离线脱出穿孔坯。

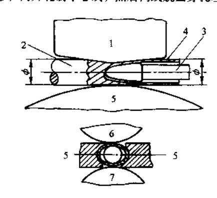


图 4.3-20 狄塞尔穿孔机孔型示意

1—轧辊；2—管坯；3—顶头；4—导板；5—狄塞尔导盘；6—上辊；7—下辊

由于在结构上的改进，与以导板为工具的二辊穿孔机相比，Diescher 穿孔机具有如下优点：

1）由于轧辊上下配置，Diescher 导盘布置得很好，易于靠近，用旋转的狄塞尔导盘取代通常沿用的固定式导板，有助于穿孔速度的提高。在固定导板穿孔机中，导板与轧件之间剧烈的滑动摩擦，造成了导板的局部高温及急剧磨损，从而限制了轧件速度的提高（一般只能达到 0.8 ~ 1.0 m/s 左右）。在 Diescher 穿孔机中，具有传动的导盘（导盘一般由液压马达带动旋转）与轧件间的接触点是变动的，因而导盘的磨损要比导板小得多，并使变形区的几何形状恒定，从而提高了空心坯的尺寸精度和表面质量。同时由于导盘磨损小，运行几周后才需重车。因此，因更换工具而停产的时间大大减少。

2）轧辊采用单独电机传动，传动轴和轧辊轴夹角小，传动装置的运行可靠性很高。由于采用直流电机传动，因此，穿孔机运行速度可变，可以采用轧制开始时轧辊转速低，但轧辊咬入管坯后速度提高这种运行模式。采用这种操作方式，轧辊线速度可高达 9 m/s，因此轧制时间缩短。

3）由于导盘可以无级调速，使其线速度略大于空心坯的出口速度，这样导盘对变形区金属施加一个轴向拉力，有助于金属的纵向流动和空心坯的纵向轧出，可以稳定地对轧制进行导向，从而在减径量很大的区域内，降低了由于轧件形成椭圆形而产生的拉应力，提高了延伸率。这对于生产薄壁管是有利的（最小壁厚为 10 ~ 11 mm）。

4）由于旋转导盘对轧件的咬入作用，改善了轧件的咬入条件，从而使 Diescher 穿孔机的轧件出口速度可达到 1.2 m/s。同时，穿孔效率的提高，使顶头寿命提高，能耗降低。

5）为了配合高速轧制节奏穿孔机后台采用顶杆自动循环冷却装置，如图 4.3-21 所示。在一般的穿孔机上，在轧完一根空心坯后，顶杆后退脱离空心坯，然后空心坯拨出，顶杆再前进到轧制位置。这样，顶杆移动距离长，加上顶头需要人工更换，因而劳动强度大、辅助时间长。在狄塞尔穿孔机后台采用了顶杆自动循环冷却装置，在轧制结束后，空心坯立即连同顶杆被同时拨出轧制线，并送进一根新顶杆，开始下一根轧件的轧制。顶杆与空心坯在轧制线外分离，这使得辅助操作时间大大缩短，使穿孔机的节奏间隔时间降为 4 s，当空心坯长度为 12 m 时，穿孔机生产率为 4 根/min（即每分钟穿轧 48 m），由此附带对工具寿命也产生有利影响，采用 6 ~ 8 根顶杆循环使用即可满足生产要求，穿孔顶头得以优化，而穿孔顶头的检查更换则可在轧制周期以外进行。

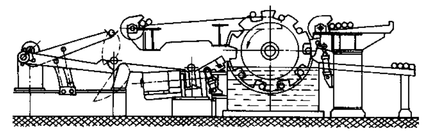


图 4.3-21 顶杆更换系统示意

6）由于使用了旋转导盘，可以减少内表面缺陷，加之它对管坯的附加轴向拉力，在顶头前管坯中心金属不易形成孔腔，这对使用连铸坯穿孔创造了条件。

Diescher 穿孔机的特点如上所述，与其他穿孔设备相对比的工艺技术特征见表 4.3-1。我国上海宝钢 ϕ140、天津钢管有限公司 ϕ250、包头钢管公司 ϕ180 等连轧管机组采用连铸坯轧管，使用的就是 Diescher 穿孔机穿孔。近年来，Diescher 穿孔机不仅在连轧管机组上，而且在其他机组，如 CPE（Cross roll Piercing - Elongating）顶管机组以及三辊行星轧管机组中都得到了应用。

表 4.3-1 几种穿孔设备工艺特征的对比

项　目	水压冲孔机	压力穿孔机	普通斜轧穿孔机	狄塞尔穿孔机
管坯形状	方形或圆形	方形	圆形	圆形
附加延伸机的必要性	有必要	有必要	没有必要	没有必要
最大延伸系数	2（包括延伸机）	3（包括延伸机）	3	5
最大管坯质量/kg（以 ϕ177.8 mm 管为例）	500	1 100	1 100	1 500
最大生产率/m·min^{-1}	10	24	24	48

3.10 新型菌式（锥形辊）穿孔机

1899 年瑞士人斯蒂菲尔（Stiefel）发明了菌式穿孔机，菌式穿孔机的轧制过程如 4.3-22 所示。轧辊为锥形辊，在水平面内轧辊轴线与轧制轴线相交角度为前进角 β，在垂直平面内轧辊轴线与轧制轴线构成一个辗轧角 γ。导向工具可

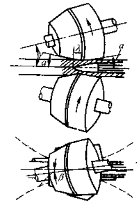


图 4.3-22　菌式穿孔示意图

用导盘或导板，锥形辊的锥底在出口方向。因此轧辊圆周速度由进口到出口是逐渐增加的，这样的轧辊运动速度和轧件运动速度更为协调，从而可以减小轴向滑移和周向附加剪切应力，最终使毛管内外表面缺陷显著减少。第一台这样的穿孔机安装在美国钢铁公司，随后这种穿孔机也在一些国家的自动轧管机组中采用。但由于老式菌式穿孔机存在轧辊是悬臂安装、刚性差，变形区短，齿轮磨损快等缺点，因而未能得到推广。

直到 20 世纪 70 年代，虽然在 Diescher 穿孔机的运行中取得了很好的经验，工程师们仍然开始了旨在进一步增大斜轧穿孔机延伸率的研究。借助于穿孔时的扩径作用，进行了生产薄壁穿孔坯的研究。采用双支承轧辊结构的新型菌式穿孔机，在前苏联、德国和日本先后研究成功。1975 年，前苏联李卜克内西钢管厂和辛那尔钢管厂新建的串联式 140 自动轧管机组采用了双支撑菌式穿孔机，1981 年曼内斯曼钢管公司在原有的 $\phi340$ mm 自动轧管机前安装了菌式穿孔机以取代串列式布置的两台 Stiefel 穿孔机，日本住友金属在 1983 年 1 月正式投产在海南厂的 $4\frac{1}{2}$ 限动芯棒连轧管机组中采用了双支承菌式穿孔机。

关于曼内斯曼钢管公司取得的关于菌式穿孔机的运行经验有以下两点值得一提：

1）由于菌式穿孔机轧辊线速度的提高，它取得了以前斜轧穿孔机所未能取得的技术可能性，延伸系数可达 6，而穿孔坯最大长度为 14 m（$D/S=30$ 时）。因此，可生产薄壁穿孔坯（D/S 可达 30），在下一个变形阶段只需要不大的延伸量即可轧成一般壁厚的成品管。

2）这种菌式穿孔机和 1 台延伸系数为 2 的轧管机（如 2 机架的长芯棒轧管机）配合，意味着可将一次性投资降至最低，图 4.3-23 示出在穿孔和延伸的两个阶段延伸率分配的

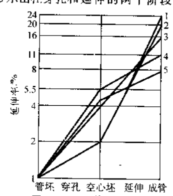


图 4.3-23　延伸率的分配
1—周期轧管机；2—CPE 机组；3—连轧管机；4—加工架芯棒轧机；5—自动轧管机

一些例子。

在生产薄壁穿孔坯的过程中也可发现，只要孔型设计得当，扩径量可达 40% 或 100 mm 左右。在无缝轧管机组中，菌式穿孔机的高变形能力可以用少数几种尺寸的管坯轧制多种尺寸的空心坯，若钢管厂配置有张减机生产小直径管，甚至有可能只采用 1 种尺寸的管坯。减少管坯尺寸的种类对降低原料成本，提高钢管生产的灵活性是很有好处的。图 4.3-24 示出具有两种孔型系列的连轧管机组，它可以用一种尺寸的管坯生产 $\phi27\sim178$ mm 尺寸范围内的各种管子。

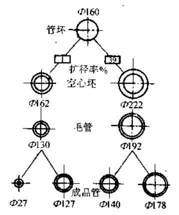


图 4.3-24　配有菌式穿孔机的连轧管机组的变形程序

曼内斯曼钢管公司和住友公司的菌式穿孔机的设计任务是满足工艺要求，这两台穿孔机均配置了狄塞尔导盘，设有轧辊喂进角调正装置和适当的传动装置，但穿孔机的轧辊是水平布置的。因此，轧机质量大、所需要的厂房面积也较大，这对一次性投资是不利的。由此对锥辊式穿孔机的设计又进行了研究，其结果是轧辊垂直布置的锥辊式穿孔机的问世，如图 4.3-25 所示。这当然是从 Diescher 穿孔机移植而来的，其机架和 Diescher 穿孔机类似，导盘是水平布置的，轧辊采取两台电机传动，但布置在轧出端，其倾斜角度和轧辊的锥角相适应，其传动轴和轧辊轴的夹角最小。轧出端可以配置顶杆止推小车或顶杆更换系统。图 4.3-26 示出机架的一种特殊设计，它既可采用导盘亦可采用导板。新的轧辊垂直布置的锥辊式穿孔机提供了将锥辊式穿孔机的工艺优越性和 Diescher 穿孔机设计结构上的优越性相结合的最佳设计。

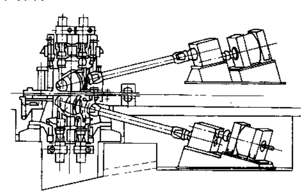


图 4.3-25　轧辊上下配置的锥辊式穿孔机（侧视图）

南非托莎（Tosa）厂 1989 年 12 月投产一台由 MDM（德马克－米尔）公司设计制造的这种菌式穿孔机，直接与张力减径机联用，不设置轧管机即可生产热轧成品管。这种被称为 CPS（Cross roll Piercing & Stretch Reducing）轧管工艺打破了由三大变形过程组成的无缝钢管生产工艺的传统格局。

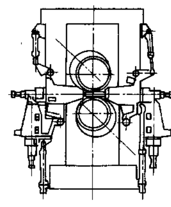


图4.3-26 轧辊上下配置的锥辊式穿孔机（横断面图）

从工艺参数方面讲，锥辊式穿孔机基本要点是两个角度值的问题即辗轧角 γ 和送进角 β。前者对一个机组来讲是定值，后者根据设计的致字可调整。由于曼内斯曼的锥辊式穿孔机采取轧辊水平布置方式，故可采用较大的辗轧角 γ（27.6°）和比较小的送进角 β（6°～12°）。当这种轧机发展为轧辊上下布置时，这样大的辗轧角显然不行，而且从工艺上讲也可以 $\beta+\gamma=25°\sim30°$ 为一判定值，故曼内斯曼钢管公司在随后的设计中随着轧辊上下布置形式的进一步发展，就将 γ 角降为10°～15°。辗轧角和可调的送进角的各种配合对穿孔过程中所发生的切向变形确实产生相当大的影响。

日本住友金属在1983年1月投产在海南厂的双支承菌式穿孔机上以各种送进角 $\beta=12°\sim16°$ 和 $\gamma=10°$、15°作试验，得出以下结论：①这种新的轧机有可能使得管坯金属流动的情况与挤压的情形相同或相似。②轧辊的 γ 角和（或）β 角越大，金属的延伸率和断面收缩率提高越明显。③对成品管内壁微小缺陷而言，$\beta+\gamma\geqslant25°$ 时，穿轧空心坯就完全没有裂纹。④采用大辗轧角和大送进角的穿孔工艺时，穿轧不锈钢不会产生内孔缺陷。⑤对于高合金及高耐热合金钢来说，只要精心选择好加热温度，采用大辗轧角和大送进角的穿孔工艺，穿孔就能成功。⑥用这种锥辊式穿孔机可以穿轧连铸圆坯面内孔不会产生显微缺陷，管子的壁厚不均很小。

日本住友将这种菌式穿孔机称作“Super Piercer”。在穿轧碳素钢管坯时，菌式穿孔机的有利的变形条件可用作“近终形穿孔”，即穿孔和成品管尺寸接近的穿孔坯，其 D/S 值在20～28这一范围内。这种菌式穿孔机已发展到十分先进的水平，作为最有效的穿孔工艺之一，目前，已在高合金钢管的生产中占有领先的地位，它的进一步运用会超越现有的界限而扩展到中合金钢管和高合金钢管的生产领域。

4 钢管在圆孔型中的纵轧

毛管轧制是热轧无缝钢管生产的主要变形工序，其作用是使毛管壁厚接近或达到成品管壁厚，和消除毛管在穿孔过程中产生的纵向壁厚不均，另外还可提高荒管内外表面质量、控制荒管外径和真圆度。根据被加工的轧件的延伸方向（主要变形方向）和轧辊圆周速度方向的关系，现有轧制方式可分为三种：纵轧、横轧、斜轧。

纵轧的特征是，金属主要流动方向与轧辊圆周速度方向一致。横轧的特征是，金属的主要流动方向垂直于轧辊圆周速度方向（如旋轧）。斜轧的特征是，金属的伸长方向与轧辊圆周速度方向构成某个角度。斜轧的特征介于纵轧和横轧之间。

将现在的轧管方法归纳如下：

- 轧管方法
  - 纵轧
    - 顶头
      - 锥形、球形 —— 自动轧管机
    - 长芯棒——连轧管机，皮尔格轧机
  - 斜轧
    - 长芯棒
      - 二辊
        - 立式带导盘——Dieschr 轧机
        - 卧式带导盘——Accu-Roll 轧机
      - 三辊——阿塞尔轧机
    - 顶头
      - 二辊、三辊 —— 均整机
  - 顶管机
  - 挤压机

4.1 圆孔型中轧管的分类

在圆孔型中的纵向轧管过程可分为两类：一类是带顶头-芯棒轧制，轧制变形区由一个顶头或芯棒和两个轧辊孔型构成；另一类是无芯棒—顶头轧制，轧制变形区由二个或三个轧辊的孔型构成。各种在圆孔型中纵向轧管的方式如图4.3-27所示。

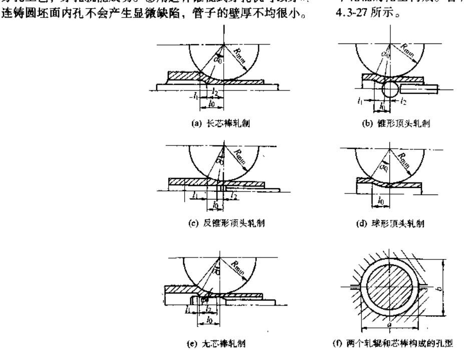


图4.3-27 在圆孔型中的轧管过程



采用圆孔型、短顶头方式纵向轧制钢管为自动轧管机，在圆孔型、长芯棒上轧制钢管为连续轧管机，无顶头—芯棒轧制为定、减径机（包括张力减径机）。

（1）自动轧管机轧管法概述

美国或者说在英语的技术文献中，甚至有时在德语技术文献中都把自动轧管机叫做“Stiefel Mill”。其实 Stiefel 并非这种轧机的发明者。

自动轧管机的诞生有两种说法：一是自动轧管机是在改进二重式轧管机的基础上发展起来的生产过程机械化的轧管机；二是自动轧管机是在周期轧管机基础上通过改孔型（包括改轧辊旋转方向），并解决人工喂料问题而发展起来的。

1903 年 11 月在位于美国宾州 Mercer 郡、隶属于 National Tube Co . 的 Greenville 厂安装了世界第一台自动轧管机，标志着在发明周期轧管机 11 年后在无缝钢管生产方面出现的第二项轧管工艺。自动轧管工艺一大特点在于轧机之后设置均整机，它使一般的三个阶段轧管法在延伸（轧管）及精轧（定减径）之间还要增加均整这一工序，即空心坯经自动轧管机轧制后，须经过均整机，以使壁厚均匀，均整后经定减径工序才热轧出成品管。这种自动轧管机组诞生于 1905 年。

自动轧管机采用的是一种短顶头轧制工艺，用风动缸使喂料实现机械化。自动轧管原理示于图 4.3-28。空心坯在自动轧管机上轧制时，芯棒杆支持在后推力座上，顶头连结在芯棒杆上，位于孔型中间，与轧辊孔型形成一个和管子壁厚相适应的环状空隙。一般管子通过两个道次轧成，第一道次轧完换顶头后，上辊抬起由回送辊回送至前台，然后再轧第二道。由于是短顶头轧制，所以该法存在有一系列的致命弱点：如毛管太短（不宜与张减机合用），管子质量较差等。

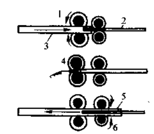


图 4.3-28 自动轧管工艺示意

1—二辊式轧管机；2—带顶头的顶杆；3—空心坯；4—工作辊；5—毛管；6—回送辊

在 20 世纪 70 年代爆发了石油危机，非 OPEC 成员国急于寻找新的油源，导致钢管需要量的剧增。这段时间（1973～1982 年）内对无缝钢管生产来说，有两条平行线在构筑之中，即：①以日本四大钢铁公司几乎在同一时间内建设 4 套 ϕ406 mm 自动轧管机组为代表的自动轧管机的发展；②以 Dalmine 钢管公司 Bergamo 钢管厂 MPM 轧管机组投产为起点的在五年内建设 7 套 MPM 轧管机组的限动芯棒轧管机的发展。这 4 套“大自动”就成为自动轧管工艺“中兴”的标志。据 Mannesmann marktforschung GMBH 在 1984 年 5 月的统计，各国拥有的自动轧管机数量如下：欧洲 23 台；美国 24 台；前苏联 12 台；日本 6 台；合计 65 台。这可以说是世界自动轧管机数量的峰值。

（2）连轧管机轧管法

连续轧管是将穿孔后的毛管套在长芯棒上，经过多机架顺次排列且相邻机架辊缝互错 90°的轧管机连续纵轧成荒管。连续轧管机主要有两种，一种是芯棒随同管子自由运动的长芯棒连轧管机，简称 MM（Mandrel Mill）；另一种是轧管时芯棒是限动的或速度可控的限动芯棒连轧管机，简称 MPM（Multi – Stand Pipe Mill）。

1）无缝钢管轧管工艺发展的趋势　无缝钢管生产工艺发展到今天，还是连轧管机轧管工艺独领风骚；就轧管工艺主要特征而言，自动轧管工艺是短顶头轧制工艺，它自然不如长芯棒轧管工艺。周期轧管工艺是一种非连续式的分段纵轧工艺，它不如连续轧管机自然也是容易理解的。顶管工艺的别称是惰辊连轧，当然不如有大功率电动机传动轧辊的连续轧管机。至于两种斜轧工艺即新式的三辊轧管机和狄塞尔轧管机都属于中等产量水平的轧管机，不能和优质高产的连续轧管机相比。

连轧管工艺经历了浮动芯棒、限动芯棒以及最近开发的三辊式限动芯棒轧制工艺三个主要发展阶段，并伴生出半浮动、半限动工艺与单机座少机架限动芯棒轧制两个“亚工艺”过程。进入 20 世纪 90 年代后，限动芯棒连轧管（MPM）成为无缝钢管轧管先进工艺的代表。

2）连轧管技术的诞生与发展　连轧管技术起始可追溯到 1887 年在美国 Virginia 的 Findlay 成立的 Kellogg Seam less Tube & Maun Co.，当时凯洛格（Charles Kellogg）任总车间主任。工厂在 1889 年 6 月开始生产，1892 年 9 月 29 日的“Iron Age”对该厂轧机作了完整的报道：“轧管机由两组轧辊组成，由位于两组轧辊中间的蒸汽机通过齿轮进行传动。每一组由 5 对轧辊组成，即 3 对水平辊（H）和 2 对垂直辊（V）。经过加热的钢锭置于小车上，芯棒由活塞杆推动，后者配置在水平气缸中，当芯棒到达预期位置时，置于其下的另一推钢机开始工作，将空心坯推入轧辊间……”。Kellogg 五机架连轧管机（3H + 2V）的问世，堪称连轧管技术的先驱。Kellogg 钢管厂停产后，钢管界的先驱在发展周期轧管技术的同时，吸取了 Kellogg 失败的经验教训，继续发展连轧工艺技术，法塞尔（Fassl）连轧管机和福伦（Foran）连轧管机起到了继往开来的作用。

Aloys Fassl 是 Komotau 和 Remscheid 钢管厂的设计师，1889 年到 Mublheim 为 August Thyssen 公司工作，1900 年为 Thyssen 公司设计了第一台斜轧穿孔机，同时建造了 1 套 12 机架的两辊式连轧管机（即 Fassl 轧管机）。1901 年这套由蒸汽机驱动的连轧管机在德国 Dinslaken 投产，并采用全浮动芯棒连轧工艺，热轧管长度为 8～10 m。1904～1907 年期间，又建造了 3 套同样的轧管机。

Foren 轧机是连续轧管机发展进程中一个重要的中间轧机。1923 年 Globe 钢管公司聘用了 Foren 为工程师，1931 年 Foren 建议公司建造、安装连续轧管机组。连轧管机机架呈 X 形，长芯棒插入穿孔坯与管子一起通过全部机架后，即将穿孔坯延伸成管子。福伦（Foren）轧管机共有 21 个机架，由可变速的电机单独驱动。按原设计，延伸率可高达 7。Foren 在美国和国外进行了专利申请，1932 年轧管机被安装在一个临时位置上，1933 年进行了几个月的试运转后，作了一些修改，然后将轧管机移至主厂房内的永久性位置上。后来（1936 年）又对福伦轧管机进行了进一步的改造。由于福伦轧机的建成，他在美国、英国均提出了专利申请并获得批准。

从连轧管机发展的全过程来看，福伦轧机是美国的第 5 台连轧管机，世界范围内的第 11 台轧管机，可参见表 4.3-2 所示。对连轧管机的发展来说，福伦轧机的意义在于：采用直流电机单独传动以代替组传动，为连轧管机的进一步发展奠定了新的基础，由此连轧管机进入了一个新阶段，人们把福伦轧机称为第二代连轧管机。连轧管机的发展在经历了 Foran 轧机阶段后，最终导致 20 世纪 50 年代初 Lorain 厂和 Gary 厂现代化连轧管机的建成。



表 4.3-2　福伦轧机之前的连轧机统计

序号	轧机名称	国别	投产年份	备　注
1	Vallourec	法	18[illegible]2	试验轧机
2	Kellogg	美	1890	3（H）+2（V）
3	Ellwood	美	1901	试验轧机
4	Fassl	德	1901	安装于德国 Dinslaken
	Fassl	德	1904 ~ 1907	共 3 台
5	щоэуАр	俄	1911	
6	Monessen	美	1913	第一台生产轧机，1924 年拆除
7	Allenport	美	1919	1929 年拆除
8	Foren	美	1932	单独传动

近 30 年来，随着科学技术的进步，在线检测技术、计算机应用技术等的迅速发展和广泛应用，使连轧管工艺及设备得到飞速发展。连轧管技术从发生、发展到成熟，经过了 80 年的历程，是众多无缝钢管生产工艺专家的集体创作，即使在美国也无法用发明家的名字来对这一工艺的轧机命名，于是称之为 "Mandrel Mill"，即（长）芯棒（MM）轧管机。

1978 年，世界上第一套限动芯棒连轧管机（MPM）在意大利达尔明钢管厂建成投产，这标志着连轧管设备和工艺技术进入了一个新的里程。20 世纪 80 年代末期，随着锥形穿孔机和张力减径工艺及设备的发展，连轧管机的机架数向着越来越少的方向发展，现在已有五机架、四机架连轧管机（MINI-MPM）问世，这标志着该技术更趋成熟。由此使机组的投资费用越来越低。目前 MINI-MPM 连轧管机组已成为高水准轧管机组的主导设备。从连轧管机轧制的钢管管径的角度而言，MINI-MPM 覆盖了 MPK-2S（一种半浮动芯棒连轧管工艺）以及全浮动芯棒连轧管工艺，而且管子质量优越，因此可以这样说，轧管工艺发展的总趋势是限动芯棒连轧管工艺（包括 MINI-MPM）成为先进工艺代表的趋势日益明显，这从新的无缝管厂的投产可以看得很清楚。

3）我国连轧管机的应用。我国目前共有 4 套连轧管机组：宝山钢铁股份有限公司的 ϕ140 mm 八机架全浮动芯棒连轧管机组，它是在 20 世纪 80 年代初从德国 DEMMAG 公司引进的；天津钢管有限责任公司的 ϕ250 mm MPM 六机架限动芯棒连轧管机组，它是在 20 世纪 80 年代末从意大利 INNSE 公司引进的；衡阳钢管（集团）有限责任公司 ϕ89 mm 六机架半浮动芯棒连轧管机组，它是在 20 世纪 90 年代从德国 DEMMAG 公司引进的；包钢钢联股份有限公司的 ϕ180 mm MINI—MPM 五机架限动芯棒连轧管机组，它是在 20 世纪 90 年代从意大利 INNSE 公司引进的。

从国内拥有的连轧管机组的类型和水平看，我国连轧管技术的发展与世界连轧管技术的发展步伐几乎是同步的，从小规格到大规格，从多机架到少机架，从全浮动芯棒轧制工艺到半浮动芯棒、限动芯棒轧制工艺，几乎覆盖了国外所有连轧工艺和设备机型。包钢钢联股份有限公司的 ϕ180 MINI—MPM 限动芯棒连轧管机组代表了当今世界连轧管技术的最先进水平。该套机组配有锥形辊穿孔机、五机架连轧管机、24 机架混合传动张力减径机，这些设备均采用了当今最新的轧管技术。

（3）定减径机轧管法

钢管定径和减径是热轧无缝钢管生产中的最后一道荒管热变形工序，其主要作用是消除前道工序（如均整、连轧管等）轧制过程中造成的荒管外径不一（同一根或同一批），以提高热轧成品管的外径精度和真圆度。钢管定、减径的轧制方法有纵轧（二辊式与三辊式）和斜轧（二辊和三辊）。目前广泛使用的是纵轧定、减径。

钢管定径、减径和张力减径过程是空心体不带芯棒的连轧过程。定径的任务是控制成品管的外径精度和真圆度，其工作机架数目较小，一般为 3 ~ 12 架。减径的任务除了起定径的作用下，还使机组的产品规格范围向小口径扩展，因此其工作机架数目较多，一般为 9 ~ 24 架。张力减径除有减径的任务外，还利用各架间建立足够大的张力来实现减径的同时达到减壁的目的。因此其工作机架数目更多，一般为 12 ~ 24 架，多达 28 架。

4.2　圆孔型中轧管变形过程

在自动轧管机上轧制钢管如图 4.3-27b、c、d 所示。在自动轧管机上轧制钢管的目的是要获得一定的壁厚（即等于热轧成品管壁厚或直接送去冷拔所需的毛管壁厚）。在轧制过程中一般是外径有少量压缩，而壁厚有较大的压缩。轧制速度一般在 1.7 ~ 4.5 m/s 范围内。延伸系数一般在 1.5 ~ 2.1 之间。

连续轧管机上轧制钢管的示意图如图 4.3-27a 所示。连续轧管机为一连轧机组，是多对轧辊同时轧制钢管（一般是 7 ~ 9 架），从而其效率较自动轧管为高。连续轧管机的特点是，变形量大，即减小直径又减小壁厚，延伸系数可达 6 以上，轧制速度高，钢管从最后一架的出口进度可达 4 m/s 以上。

定减径机也是连轧机，与连续轧管机的区别在于不带长芯棒轧制。定径机的作用是要获得规定的钢管外径，因此，钢管在定径机上的变形是很小的，轧制速度也较小。定径机的架数一般为 3 ~ 7 架。

无张力减径机在壁厚变化不大的情况下减小管子的外径，一般壁厚要稍许增加，变形较定径机为大，但每架上的延伸系数一般不超过 1.04 ~ 1.05。无张力减径机架数一般是 9 ~ 24 架。

在带张力减径机上轧管时，不但可减小直径，而且可以减小壁厚（或保持壁厚不变），从而变形量较大，外径减小量可达 75% ~ 80%，壁厚减小量可达 35% ~ 40%，总延伸系数可达 10 以上。钢管从最后一架的出口速度可达 10 ~ 12 m/s（甚至更高）。张力减径机的架数一般在 12 ~ 24 架范围内。

在短顶头上轧管时，毛管用推料机将钢管送人轧辊孔型中，管子首先和孔型侧壁 *abcd* 四点相接触（如图 4.3-29 所示）。由于轧辊是旋转的，管子靠和轧辊之间的摩擦力被曳入变形区中（即一次咬入）。当实现一次咬入后，在两个轧辊作用下（即上下轧辊两个孔槽逐渐靠拢），产生了压扁变形。

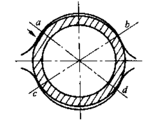


图 4.3-29　毛管和孔型开始接触点

压扁变形的实质在于管子横断面面积没有变化，仅仅是管子在压缩方向上高度减小，横向宽度增加，而管子周边几乎不变化。因此压扁实际上是塑性弯曲变形，而不是塑性压缩变形。随着管子逐渐进入变形区，压扁变形将逐渐增加，但同时管子和孔型的接触面积也逐渐增加，直到管子完全和孔型壁相接触（孔型充满），压扁变形就不再产生了。



一开始只产生压扁变形而不产生延伸变形的原因是：在开始咬人时期，由于管子和轧辊接触面积很小，接触摩擦力也很小，这样纵向延伸变形实际上是产生不了，相反径向压力足可以把管子压扁。因为压扁变形比起延伸变形所需的力要小得多，只有当接触摩擦力增加到一定程度之后纵向延伸变形才能开始。这时孔型侧壁的支持作用增加，不再产生压扁，而金属则被迫产生延伸变形。

在孔型中结束钢管外形压扁的截面位置由许多工艺因素决定，如孔型形状、金属塑性、轧辊直径以及管子直径与壁厚之比 D/S。除孔型形状外，D/S 值的影响最大；管子直径对壁厚之比值越大，管子外形越易压扁，在同一孔型形状下管子延伸变形就越小。即在同一孔型尺寸下，厚壁管减径比薄壁管减径延伸大。

压扁变形结束后即进入减径变形。在减径过程段除了产生延伸变形外，还会产生壁增厚。壁增厚变形相当于宽展变形。在孔型顶部区宽展主要发生在管子内壁，而外壁则受孔槽壁的限制，在侧壁处宽展可向内外壁发展，这样侧壁处壁加厚值要大些。到管子内壁和顶头相接触时即进人壁厚压下区段，在这个区中主要是壁厚压下，而外径也有少许减小。侧壁处的管壁由于受到孔型顶部金属延伸的拉力作用，壁厚也减薄。

在短顶头上第二道轧管时的变形过程大致是相同的，但由于是椭圆形管子进入圆孔型，开始咬人时的接触位置在孔型顶部。

在长芯棒上连轧管时由于毛管内径大于芯棒直径，变形过程也由减径区段（包括压扁变形）和壁厚压下区段组成。但由于是连轧过程，加上心棒运动状态的变化，其变形过程要复杂得多。

定减径机的变形区仅有减径区段，无张力减径的变形过程也首先是产生压扁变形，充满孔型后才是减径变形。一般情况下，减径同时产生延伸变形和壁加厚，而张力减径时所不同的是壁减薄。

4.3 圆孔型中轧管的变形区和孔型的几何参数

（1）变形区的几何参数

长芯棒轧管时的变形区参数如图 4.3-27a 所示。在短顶头上轧管时孔形顶部变形区的参数如图 4.3-27b、c、d 所示。无芯棒轧管时的变形区参数如图 4.3-27e 所示。

孔型顶部接触弧的水平投影叫做变形区长度 l_0，可按下式近似确定：

$$l_0 = R_{min}\sin\alpha_0 = R_{min}\sqrt{1-\cos^2\alpha_0} \tag{4.3-50}$$

因为

$$\cos\alpha_0 = 1 - \frac{d_0 - d_k}{2R_{min}}$$

所以

$$l_0 = R_{min}\sqrt{1-\left(1-\frac{d_0-d_k}{2R_{min}}\right)^2} \tag{4.3-51}$$

式中，d_0、d_k 为分别为轧前、轧后管子直径；R_{min} 为轧辊最小半径；α_0 为咬人角。

确定所有圆孔型中轧管的变形区长度均用此公式。变形区中减径区长度 l_1 等于：

$$l_1 = l_0 - l_2 \tag{4.3-52}$$

变形区中减壁区长度 l_2 已知后则可计算出 l_1。

球形顶头减壁变形区长度 l_2 为

$$l_2 = (R_{min} + S_0)\sin\alpha_2 \tag{4.3-53}$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{(R_{min}+S_0)^2 + (R_{min}+S_k+r)^2 - r^2}{2(R_{min}+S_0)(R_{min}+S_k+r)} \tag{4.3-54}$$

式中，S_0、S_k 为分别为轧前、轧后管子壁厚；r 为球形顶头半径。

锥形顶头减壁变形区长度 l_2 为

$$l_2 = \cos\varphi\sqrt{(R_{min}+S_0)^2\ (R_{min}+S_k-L_u\mathrm{tg}\varphi)^2\cos\varphi} - 0.5\,(R_{min}+S_k-L_u\tan\varphi)\sin^2\varphi \tag{4.30-55}$$

式中，φ 为顶头锥角；L_u 为顶头圆柱带宽度之半；

对于长心棒轧管，l_2 可由下式确定（图 4.3-27a）：

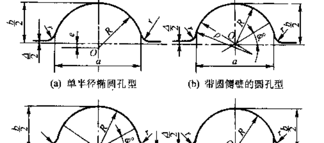
$$l_2^2 = (R_{min}+S_0)^2 - (R_{min}+S_k)^2$$

故

$$l_2 = \sqrt{(S_0-S_k)(2R_{min}+S_0+S_k)} \tag{4.3-56}$$

（2）孔型的几何参数

在芯棒－顶头上和无顶头二辊式纵向轧制钢管时使用的孔型如图 4.3-30 所示。所用的孔型有：椭圆形孔型（图 4.3-30a），带圆弧侧边斜度的圆孔型（图 4.3-30b），带直线侧边斜度的圆孔型（图 4.3-30c）和圆孔型（图 4.3-30d）。



(a) 单半径椭圆孔型　(b) 带圆侧壁的圆孔型

(c) 带切线侧壁的圆孔型　(d) 圆孔型

图 4.3-30　二辊式纵向轧管的孔型示意

在三辊轧机上所用的孔型如图 4.3-31 所示，各种孔型的几何参数有：辊缝 Δ，孔型宽度 a，孔型高度 b，孔型偏心距 e，孔型顶部圆弧的半径 R，侧壁圆弧的半径 ρ，圆角半径 r，侧壁斜角 φ''，孔型椭圆度系数 θ。

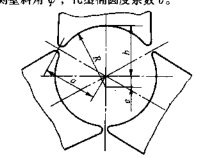


图 4.3-31　三辊式纵向轧制钢管的孔型示意

已知孔型宽度 a 和高度 b，则可确定孔型扁心距 e、孔型顶部圆弧的半径 R 和孔型椭圆度系数 θ：

$$e = \frac{a^2-b^2}{4b} = \frac{b}{4}(\theta^2-1)$$

$$R = \frac{a^2+b^2}{4b} = \frac{b}{4}(\theta^2+1) \tag{4.3-57}$$

式中：$\theta = \frac{a}{b}$。

侧壁圆弧的半径 ρ：

$$\rho = \frac{a^2+b^2-2ab\cos\varphi''}{4(b-\theta b\cos\varphi'')} \tag{4.3-58}$$

带入孔型椭圆度系数和 $R = b/2$，整理后得：

$$\rho = R\left[1+\frac{\theta^2-1}{2(1-\theta\cos\varphi'')}\right] \tag{4.3-59}$$

对于三辊轧机：

$$R = \frac{a^2+b^2-ab}{2b-a} = \frac{b(\theta^2-\theta+1)}{2-\theta}$$



$$e=\frac{a^2-b^2}{2b-a}=\frac{b\ (\theta^2-1)}{2-\theta}$$

$$R=b+e \qquad (4.3\text{-}60)$$

4.4　圆孔型中轧管的运动学

(1) 速度分析

圆孔型中轧管运动学是讨论工具和轧件的运动速度之间关系。轧管时轧辊孔型的形状决定了荒管从轧辊出来的速度，也就决定了轧机的生产率。圆孔型中轧管的运动学特点是孔型（轧槽）上各点的辊径与圆周线速度不相等，孔型顶部的圆周线速度最小，靠近辊环处的圆周线速度最大（图 4.3-32）。

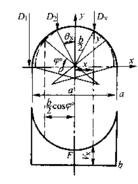


图 4.3-32　孔型上点的速度分布

孔槽表面上任一点速度是轧辊速度的线性函数，即：

$$v_x=\frac{\pi D_x n_g}{60} \qquad (4.3\text{-}61)$$

式中，D_x 为任一点的轧辊直径，mm；n_g 为轧辊转速，r/min。

孔型宽度上的平均速度为图 4.3-32 中速度曲线下的面积 F 除以孔型宽度，即

$$v_c=\frac{F}{a}=\frac{\pi n_g}{60}D_c \qquad (4.3\text{-}62)$$

式中，F 为速度图面积；D_c 为对应于平均速度的轧辊直径。

速度图面积可用积分法求出（图 4.3-32）：

$$F=2\int_0^{a/2}v_x\mathrm{d}x=\frac{2\pi n_g}{60}\int_0^{a/2}D_x\mathrm{d}x$$

对应于平均速度的轧辊直径 D_c 可如下表示：

$$D_c=D_0-\lambda b \qquad (4.3\text{-}63)$$

式中，D_0 为轧辊原始直径；λ 为孔型形状系数。

当采用圆和椭圆孔型，孔型椭圆度系数 $\theta=1.05\sim1.12$ 时，$\lambda\approx0.75$。在自动轧管机上轧管时，可以近似将平均轧辊直径看作轧辊工作直径 D_k，则 D_k 为

$$D_k=D_c=D_0-0.75b \qquad (4.3\text{-}64)$$

无张力定减径机一般也用此式计算。

(2) 前滑

在变形区出口截面上，较轧辊工作直径 D_k 小的孔型上各点，其金属纵向流动速度大于轧辊圆周线速度，将产生前滑（图 4.3-33）；较 D_k 大的孔型上各点将产生后滑现象。显然，管子出口速度大于孔型顶部圆周线速度，产生前滑；而孔型侧壁处产生后滑。最大的前滑在孔型顶部，一般实际计算时用下式求出最大前滑系数值

$$\omega=\frac{v_k}{v_{min}}=\frac{D_k}{D_0-b} \qquad (4.3\text{-}65)$$

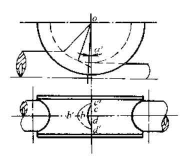


图 4.3-33　圆孔型轧管时的前滑分布

cbd—轧薄壁管的前滑区；$c'b'd'$—轧厚壁管的前滑区

变形区内的其他横截面上，也可能存在着轧辊水平分速度与轧件表面水平速度相等点，将这些点连结构成一条空间曲线（图 4.3-33），成为变形区内前、后滑区的分界线。实验资料得出，在自动轧管机上轧制薄壁管时前滑主要产生在减壁区内，而轧制厚壁管时前滑区将扩展到减径区，但前滑区长度小于变形区长度。据此可知毛管进入变形区时处于后滑状态，即

$$\frac{v_{min}}{v_k}\cos\alpha_0<\frac{v_k}{\mu}$$

$$v_k=v_{min}\,\omega$$

故

$$\omega>\mu\cos\alpha_0 \qquad (4.3\text{-}66)$$

式中，μ 为轧管一道的延伸系数；α_0 为孔型顶部的咬入角，(°)。

4.5　在圆孔型中轧管时的咬入条件

带顶头轧管时，咬入也有一次咬入和二次咬入。第一次咬入是轧辊将毛管曳入减径变形区；第二次咬入是指顶头刚接触毛管能克服顶头阻力而进入减壁区，直至建立稳定轧制过程。

(1) 实现一次咬入条件

1) 按毛管与轧辊孔型开始接触点确定一次咬入条件。此时的轧件受力分析如图 4.3-34 所示，轧件与孔型侧壁四点接触，故

$$T_x\geqslant N_x,\quad T_x-N_x\geqslant0$$

$$T_x=Nf\cos\alpha,\quad N_x=N\sin\varphi''\sin\alpha$$

则

$$f\geqslant\tan\alpha\sin\varphi'' \qquad (4.3\text{-}67)$$

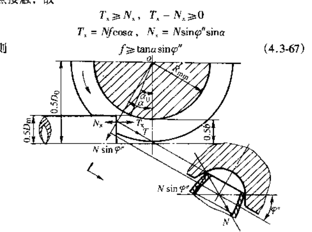


图 4.3-34　轧管一次咬入时轧件受力分析

而按几何关系得

$$\tan\alpha=\sqrt{\frac{(D_0-b\sin\varphi'')^2-(D_0-\sqrt{D_m^2-b^2\cos^2\varphi''})^2}{(D_0-\sqrt{D_m^2-b^2\cos^2\varphi''})^2}} \qquad (4.3\text{-}68)$$

式中，f 为金属与轧辊接触面间的摩擦系数；φ''为孔型侧壁角，(°)；α 为毛管与孔型开始接触点的咬入角，(°)；D_m 为

毛管外径，mm；b 为孔型高，其值 $b=D_z$；

2）按孔型顶部确定一次咬入条件。这种方法与普通纵轧相同，即一次咬入条件为

$$f \geqslant \tan\alpha_0$$

$$\alpha_0=\arccos\left(1-\frac{D_m-b}{2R_{\min}}\right) \tag{4.3-69}$$

通常，轧管温度为 1 100℃左右，轧制速度不大于 5 m/s，摩擦系数 $f\approx 0.3$，$\varphi''=30°$，理论上 α 值允许达 30°，α_0 值允许达 17°。因此在有推料器送料的情况下，实现轧管的一次咬人是有保证的。

（2）实现二次咬入条件

1）二次咬入时受力分析。二次咬入时毛管受力情况如图 4.3-35 所示，二次咬人的力平衡条件为

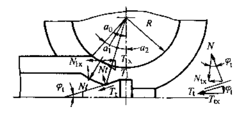


图 4.3-35 轧管二次咬入时的受力分析

$$(T_{1x}-N_{1x})\geqslant N_{tx}+T_{tx} \tag{4.3-70}$$

式中，T_{1x}为减径区轧辊作用于毛管摩擦力的水平分力，其值为 $T_{1x}=\bar{p}_1F_1f\cos\left(\frac{\alpha_0+\alpha_2}{2}\right)$；$N_{1x}$为减径区轧辊作用于毛管上的正压力水平分力，其值为 $N_{1x}=\bar{p}F_1f\sin\left(\frac{\alpha_0-\alpha_2}{2}\right)$；$T_{tx}$为顶头作用于毛管上的摩擦阻力的水平分力，其值为 $T_{tx}=\bar{p}_tF_tf_t\cos\varphi$；$N_{tx}$为顶头作用于毛管上正压力的水平分为，其值为 $N_{tx}=\bar{p}_tF_t\sin\varphi$

由于减径区内的平均单位压力 $\bar{p}_1$ 和毛管与顶头接触面上的平均单位压力 $\bar{p}_t$ 未知，故平衡式（4.3-70）无法解出。但从式中可以看出，要实现二次咬入，需要有一定的减径区长度 l_1 和限制一定的 α_2 值，以保证减径区提供足够的剩余摩擦力来克服顶头阻力。同时顶头锥角 φ 不能太大，这是因为增大 φ 后虽然 $\cos\varphi$ 值减小，但 $\sin\varphi$ 增大的速率要大，结果使轴向阻力增加（N_{tx}增加大），而影响二次咬人的实现。

2）二次咬入条件经验式。实现二次咬入的条件为

$$\tan\alpha_2<\frac{2B-\tan\alpha_0}{1+2B\tan\alpha_0} \tag{4.3-71}$$

$$B=\frac{1}{E}\left[f\sqrt{\frac{\tan^2\varphi}{E^2}+1}-\tan\varphi\right]$$

$$E=Af+1 \qquad A=f_t+\tan\varphi$$

式中，α_2 为减壁区中心角，又称二次咬入角，其值为

$$\tan\alpha_2\approx\frac{\Delta S/\tan\varphi}{0.5\ (D_0-D_1+2\Delta S)} \tag{4.3-72}$$

代人公式 4.3-71 可得实现二次咬入最大允许的减壁量为

$$\Delta S<\frac{0.5\ (D_0-D_1)\ (2B-\tan\alpha_0)\ \tan\varphi}{(1-2B\tan\varphi)\ +\ (2B+\tan\varphi)\ \cos\alpha_0} \tag{4.3-73}$$

式中，ΔS 为道次减壁量（按孔型顶部计算），mm；f_t 为金属与顶头间的摩擦系数，直接接触时为0.33～0.35，当用食盐润滑时为：0.2～0.25；D_1 为对应于 α_2 处的毛管直径，其值为 $D_1=2R_{\min}\ (1-\cos\alpha_2)\ +\alpha$。

3）轧制第二道时的咬入条件。对于自动轧管的第二道次和连轧管机以后各道次轧管时，由于管子是椭圆形的且椭圆长轴先和孔槽接触，从而荒管咬入时先与孔型顶部接触，故其二次咬入条件（按第一道次轧件正常充满考虑）为

$$\left.\begin{aligned}&\tan\alpha_0'\leqslant f\\&\alpha_0'=\arccos\left(1-\frac{b-a}{2R_{\min}}\right)\end{aligned}\right\} \tag{4.3-74}$$

式中，α_0' 为第二道次的咬入角，(°)；a、b 为孔型宽度和高度，mm。

二次咬入条件为

$$\tan\alpha_2'<\frac{2B-\tan\alpha_0'}{1+2B\tan\alpha_0'} \tag{4.3-75}$$

式中符号同式（4.3-71）。

4）带后推力时的一次咬入条件。带后推力轧管（包括空心轧管）的一次咬入条件，推荐按下式确定

$$\tan\alpha\leqslant\frac{2f}{1-f^2} \tag{4.3-76}$$

当摩擦系数 $f=0.3$，$\tan\alpha\leqslant 0.66$ 时，咬入角相当于 33°30′；当 $f=0.2$，$\tan\alpha\leqslant 0.42$ 时，$\alpha=22°40'$。而在自动轧管机上的咬入角均小于 15°。因此，带后推力时实现一次咬入是毫无问题的。由此可知，在钢管连轧机组上，只要第一架咬入后，以后各架均为带后推力咬入，因此一次咬入均无问题。

5）影响轧管咬入条件的因素。自动轧管机上轧管时，建立稳定轧管过程的关键也是二次咬入条件，在实际生产中常遇到的影响咬人的因素有以下几点：

① 毛管外径 D_m 小，不好咬入，特别是轧制厚壁管时更加明显。这因为 D_m 小使减径区长度减小，而厚壁管的压扁变形程度小使减径区接触宽度减小，结果使减径区内金属与轧辊的接触面积减小，曳人摩擦力减小，咬入困难。实际生产中一般在轧前，常将顶头试放人毛管内，若能将顶头方便放入或取出，则认为轧制时咬入问题不大。

② 毛管温度低，这常在轧制薄壁管时出现，虽然温度降低摩擦系数增加可使曳人摩擦力增加，但因使金属变形抗力增加，顶头轴向阻力显著增加，而咬入困难。

③ 毛管壁厚 S_m 大或顶头伸出过前，会导致减径区长度减小，而咬入困难，因此生产时须经常检查 S_m 和顶头位置。

④ 轧辊被磨光，使摩擦系数减小，咬入困难。产生这种现象时，可采取关闭轧辊冷却水，减小减壁量，使毛管实现咬入，待孔型变得粗糙些后，恢复正常工艺，咬入条件会改善。

⑤ 孔型椭圆度系数增大，可增加毛管在减径区压扁程度而增加接触宽度，使曳入摩擦力增加，有利于实现二次咬入。

⑥ 带后接力咬人，后推力使毛管横向变形增加（压扁变形），金属与轧辊接触面积增大，曳人摩擦力增加而有利于咬人。

4.6 纵轧钢管的力参数计算

以自动轧管机为例介绍纵轧钢管的力参数计算。自动轧管的力参数包括：轧制力 P、顶头轴向力 Q 和轧制力矩 M_{zh}。

（1）轧制力 P

由图 4.3-36，轧制力 P 为

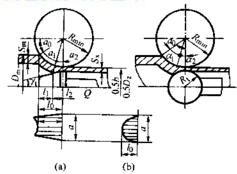


图 4.3-36　轧管轧制力计算图示

$$P = \overline{p}_1 F_1 + \overline{p}_2 F_2 \quad (4.3\text{-}77)$$

$$F = F_1 + F_2$$

式中，$\overline{p}_1$、p_2 为减径及减壁区内平均单位压力，MPa；F、F_1、F_2 为总接触面积的水平投影面积、减径和减壁区接触面积的水平投影面积，mm^2。

1）求接触面积。根据几何关系可得，轧制变形区总的水平投影面积为

$$F = F_1 + F_2 = a\left(1 + \frac{D_0}{12D_{\min}}\right)\sqrt{\frac{D_{\min}}{2}(D_m - b)} \quad (4.3\text{-}78)$$

式中，a、b 为孔型宽度和高度，mm；D_0 为轧辊名义直径，mm；$D_{\min}$为孔型顶部的轧辊直径，mm；D_m 为毛管外径（或轧前高度），mm。

式（4.3-78）计算结果偏低，薄壁管结果比实际低 25%～40%；厚壁管低 15%～20%。对于小型机组误差较小，约比实际低 10%左右。偏低的原因是公式 4.3-78 中没有考虑压扁变形引起的接触面积增加。各区接触面水平投影面积为

$$F_2 = (1.06 \sim 1.1)\ al_2$$

$$F_1 = F - F_2 \quad (4.3\text{-}79)$$

式中，l_2 为减壁变形区长度，mm。按式（4.3-53）、(4.3-55) 或（4.3-56）计算。

2）平均单位压力确定 减径区内的平均单位压力 $\overline{p}_1$ 为

$$\overline{p}_1 = n_1 \frac{2S_m}{D} \quad (4.3\text{-}80)$$

$$n_1 = 1 + 0.9\frac{\overline{D}}{l_1}\sqrt{\frac{S_m}{D}}$$

式中，n_1 为估计外区对平均单位压力的影响系数；S_m 为毛管壁厚，mm；l_1 为减径变形区长度，mm，按 4.3 第（1）小节中的公式计算；$\overline{D}$ 为减径区毛管的平均直径，mm，其值为 $\overline{D} = \frac{1}{2}(D_m + D_1)$

$$D_1 = R_{\min}(1 - \cos\alpha_2) + \alpha$$

至于金属的屈服极限值（kN/mm^2），考虑到变形速度 $\overline{u}_1$（s^{-1}）的影响，由图 4.3-37 中的曲线确定。图中 $\overline{u}_1$ 由下式确定

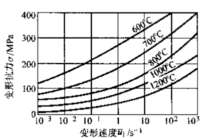


图 4.3-37　σ_s 的确定

$$\overline{u}_1 = \frac{2v_{\min}}{D}\sin\frac{\alpha_0}{2}$$

减壁区平均单位压力 $\overline{P}_2$ 为

$$\overline{p}_2 = n_f(1.15\sigma_s) = n_f K \quad (4.3\text{-}81)$$

式中，n_f 为外摩擦影响系数，它可根据 $2f\frac{l_2}{\Delta S}$值和$\frac{\Delta S}{S_m}$值由图 4.3-38 确定。图中的 ΔS 按下式计算

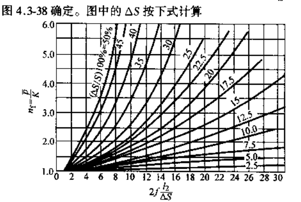


图 4.3-38　减壁区平均单位压力的确定

$$\Delta S = S_m\left[1 - \frac{D_m - S_m}{\mu(D_z - S_z)}\right]$$

μ 为该道次的延伸系数；D_m，D_z，S_m，S_z 为分别为轧管前后管的外径和壁厚，mm；σ_s 为减壁区内金属的屈服极限，kN/mm^2，由图 4.3-37 确定，图中的变形速度 $\overline{u}_2$，(s^{-1}) 由下式确定：

$$\overline{u}_2 = \frac{2v_{\min}}{S_m + S_z}\alpha_2$$

式中，α_2 为减壁区中心度（rad），由 4.3 第（1）小节中公式计算。

上式计算出来的轧制力只能给出大致结果，为可靠应参考有关实测曲线（图 4.3-39）加以对比。

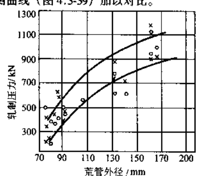


图 4.3-39　自动轧管机轧制力实测曲线

（2）顶头轴向力 Q

顶头轴向力可按下式计算：

$$Q = \overline{p}_t \pi D_u\left[(f_t + \tan\varphi)\ l_2 - 0.5 l_u \tan\varphi\right] \quad (4.3\text{-}82)$$

式中，$\overline{p}_t$ 为金属对顶头的平均单位压力，MPa；f_t 为金属与顶头间的摩擦系数，$f_t = 0.15 \sim 0.35$；l_u为顶头圆柱段长度，mm；D_u为轧管顶头直径，mm。

公式中 $\overline{p}_t$ 值难于精确确定，因此 Q 也可采用实测经验式来确定

$$Q = (0.25 \sim 0.4)\ P \quad (4.3\text{-}83)$$

（3）每个轧辊的纯轧制力矩 M_{zh}

传动每个轧辊的纯轧制力矩 M_{zh} 可按下式计算（参见图 4.3-40）：

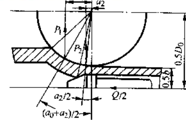


图 4.3-40 计算自动轧管机轧制力矩图示

$$M_{zh} = P_1 a_1 + P_2 a_2 + \frac{1}{4} QD_0 \qquad (4.3\text{-}84)$$

式中，P_1、P_2 为减径区和减壁区轧制力，kN；a_1 为减径区力臂，mm。其值 $a_1 = R_{min}\sin\frac{\alpha_0+\alpha_2}{2}$；$a_2$ 为减壁区力臂，mm。其值 $a_2 = R_{min}\sin\frac{\alpha}{2}$

按此式计算得的纯轧制力矩的基本部分（约占 70%）是轴向力 Q 引起的力矩，这主要是由于 Q 力的力臂 $R_0 = \frac{1}{2}D_0$ 显得过大。轧管时，轧件的行进依靠轧辊作用的水平分力来克服轴向力的。因此，轧件反作用于轧辊的水平力 $\frac{Q}{2}$（对一个轧辊面言）的作用点不在 R_0 处，而可认为金属与轧辊接触而在垂直面上投影面积的重点处，其力臂 R' 约为

$$R' = \frac{1}{2}D_0 - \frac{\Delta g}{2} - \left(\frac{1}{3} - \frac{2}{3}\right)a \qquad (4.3\text{-}85)$$

式中，Δg 为辊缝，mm；b 为孔型高，mm。
则式（4.3-85）可改写成

$$M_{zh} = P_1 a_1 + P_2 a_2 + \frac{1}{2}R'Q \qquad (4.3\text{-}86)$$

至于传动轧辊轧管所需克服的其他力矩（空载力矩，摩擦力矩，动力矩等）的计算方法同轧制原理中的方法。

4.7 钢管空心轧制

钢管定、减径和张力减径是空心体不带芯棒的连轧过程（图 4.3-41），因而它在金属流动、张力对轧制过程的具体影响和轧制力能参数等方面都与普通实心轧制过程有所区别。

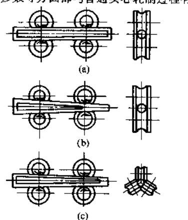


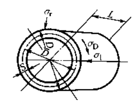
图 4.3-41 钢管定径、减径和张力减径

（1）钢管空心轧制时的变形

在定径、减径和张力减径过程中，钢管在直径压缩的同时其壁厚也将发生变化（增壁或减壁），因此掌握定、减径过程中的壁厚变化规律，对于正确制订定、减径工艺，保证产品壁厚精度是十分重要的。而壁厚变化与张力大小以及壁厚与外径之比值（S/D 值）等因素有关。

1）张力在定、减径时对金属变形的影响

① 钢管定、减径时的应力分析。定径、减径时空心钢管如受到轧辊孔型径向压缩，则在变形区内的金属受到径向应力 σ_r，切向应力 σ_D 和轴向应力 σ_l（图 4.3-42）。但是在变形区内无论沿变形纵截面还是横截面上 σ_r、σ_D、σ_l 的分布都是不均匀的。轴向应力 σ_l 从变形区人口至出口逐渐增加，而径向应力 σ_r 或切向应力 σ_D 则逐渐减小。分析实际定减径变形过程相当复杂，为了便于分析，假设 σ_r、σ_D、σ_l 沿变形区均匀分布并等于这些应力的平均值。因此，目前研究得到的一些有关定减径过程理论计算只能给出定性的、大致的结果。



4.3-42 减径时应力示意

② 定、减径时的变形。根据塑性变形的基本假设：在某一方向上的真应变与该方向上的正应力 σ 和平均应力 $\bar{\sigma}$ 之差（即偏差应力）成正比，即

$$(\sigma_{li} - \bar{\sigma}_i) : (\sigma_{Di} - \bar{\sigma}_i) : (\sigma_{ri} - \bar{\sigma}_i) = e_{li} : e_{Di} : e_{ri} \qquad (4.3\text{-}87)$$

式中，$\sigma_{li}, \sigma_{Di}, \sigma_{ri}$ 为 i 架的轴向、切向和径向应力，MPa；σ_i 为 i 架的平均应力，MPa，其值为 $\bar{\sigma}_i = \frac{1}{3}(\sigma_{li} + \sigma_{Di} + \sigma_{ri})$；$e_{li}, e_{Di}, e_{ri}$ 为 i 架的轴向、切向和径向真变形（对数变形），其值分别为 $e_{li} = \ln\frac{l_i}{l_{i-1}} = \ln\mu_i$，$e_{Di} = \ln\frac{D_i - S_i}{D_{i-1} - S_{i-1}}$，$e_{ri} = \ln\frac{S_i}{S_{i-1}}$；$D_i$，$D_{i-1}$ 为 i 架轧后和轧前的钢管外径，mm；l_i，l_{i-1} 为 i 架轧后和轧前的钢管长度，mm；S_i，S_{i-1} 为 i 架轧后和轧前的钢管壁厚，mm；μ_i 为 i 架上轧制延伸系数。

根据体积不变定律，三个真变形的关系为 $e_{li} + e_{Di} + e_{ri} = 0$

将塑性变形条件 $\sigma_{li} - \sigma_{Di} = K$（$K$ 为金属的平面变形抗力，MPa）代入 $\bar{\sigma}_i$ 计算式，并假设 σ_{ri} 为零（不考虑钢管壁厚的影响），则得

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{3}(2\sigma_{li} - K)$$

将上式代入公式（4.3-87），再用 K 除之，则得到以下比例式

$$(1 - 2Z_i) : (Z_i + 1) : (Z_i - 2) = e_{ri} : e_{li} : e_{Di} \qquad (4.3\text{-}88)$$

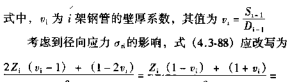
式中，Z_i 为张力系数，其值为轴向应力与变形抗力 K 之比值，即

$$Z_i = \frac{\sigma_{li}}{K}$$

③ 张力对钢管定减径变形的影响。式（4.3-88）可以明显看出张力系数 Z_i 对金属流动的影响。若 $\sigma_{li} = 0$ 则 $Z_i = 0$，代入公式（4.3-88）得

$$1 : 1 : (-2) = e_{ri} : e_{li} : e_{Di}$$

这意味着钢管切向压缩（即减径）变形的金属一半向长度方向流动（即延伸变形），另一半向钢管厚度方向流动（即增厚）。这为无张力定减径的变形情况。



若 $\sigma_{li}=0.5K$，则 $Z_i=0.5$，同样可得

$$0:1.5:(-1.5)=e_{ri}:e_{li}:e_{Di}$$

这时钢管壁厚保持不变，减径变形的金属仅向长度方向流动。

若 $\sigma_{li}=K$，即理论上最大的张力系数 $Z_i=1$，则可得

$$(-1):2:(-1)=e_{ri}:e_{li}:e_{Di}$$

这时减径变形的金属与壁厚减薄的金属以等量向钢管长度方向流动（既在减径同时实现减壁）。这也是理想情况，因 $Z_i=1$ 时钢管将被拉断，一般 $Z_i \ngtr 0.8$。张力减径相当于第二、三情况之间，即张力系数应为 $0.5\leqslant Z_i\leqslant 1$。

④ 张力减径变形方程式。式（4.3-88）是在不考虑径向力的影响得到的（$\sigma_{ri}=0$），实际上 $\sigma_{ri}\neq 0$，因此不能忽略其影响。对于薄壁管的径向平均应力 σ_{ri} 为

$$\sigma_{ri}=\sigma_{Di}\frac{S_{i-1}}{D_{i-1}}=\sigma_{Di}v_i$$

式中，v_i 为 i 架钢管的壁厚系数，其值为 $v_i=\frac{S_{i-1}}{D_{i-1}}$

考虑到径向应力 σ_{ri} 的影响，式（4.3-88）应改写为

$$\frac{2Z_i(v_i-1)+(1-2v_i)}{e_{ri}}=\frac{Z_i(1-v_i)+(1+v_i)}{e_{li}}=\frac{Z_i(1-v_i)-(2-v_i)}{e_{Di}} \tag{4.3-89}$$

上式称为钢管张力减径变形方程式，并可将此式绘制成图（见图4.3-43）。此图反映三个真变形比值与平均张力系数 $\overline{Z}\left(\overline{Z}=\frac{Z_i+Z_{i+1}}{2}\right)$ 和壁厚系数 v 的关系。当已知 $\overline{Z}$ 和 v 时，则可求得各真变形的比值，也可在一定减径量下确定张力系数和可达到的减壁量.

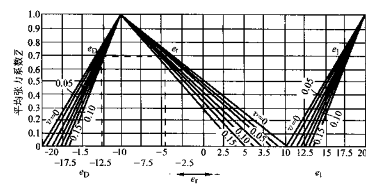


图4.3-43 张力减径变形方程式的图解

由式（4.3-89）可得

由于
$$e_{ri}=\frac{2Z_i(v_i-1)+(1-2v_i)}{Z_i(1-v_i)-(2-v_i)}e_{Di}$$

$$e_{ri}=\ln\frac{S_i}{S_{i-1}},\quad e_{Di}=\ln\frac{D_i-S_i}{D_{i-1}-S_{i-1}}$$

则
$$\ln\frac{S_i}{S_{i-1}}=\frac{2Z_i(v_i-1)+(1-2v_i)}{Z_i(1-v_i)-(2-v_i)}\ln\frac{D_i-S_i}{D_{i-1}-S_{i-1}}$$

令
$$\frac{2Z_i(v_i-1)+(1-2v_i)}{Z_i(1-v_i)-(2-v_i)}=C$$

则
$$\frac{S_i}{S_{i-1}}=\left(\frac{D_i-S_i}{D_{i-1}-S_{i-1}}\right)^C \tag{4.3-90}$$

为了运算方便，以 $\frac{D_i}{D_{i-1}}$ 近似代替 $\frac{D_i-S_i}{D_{i-1}-S_{i-1}}$（其误差不超过2%），则式（4.3-90）改写成

$$(1-\varepsilon_{ri})=(1-\varepsilon_{Di})^C$$

成
$$\varepsilon_{ri}=1-(1-\varepsilon_{Di})^C \tag{4.3-91}$$

式中，ε_{ri} 为 i 机架相对减壁量（又称减壁率），其值为 $\varepsilon_{ri}=\frac{S_{i-1}-S_i}{S_{i-1}}\times100\%=1-\frac{S_i}{S_{i-1}}$；$\varepsilon_{Di}$ 为 i 机架相对减径量（又称减径率），其值为

$$\varepsilon_{Di}=\frac{D_{i-1}-D_i}{D_{i-1}}\times100\%=1-\frac{D_i}{D_{i-1}}。$$

当已知 ε_{Di} 和 Z_i 时，此式可用来求出各机架的相对减壁量，即可求得各架钢管轧后壁厚，即 $S_i=(1-\varepsilon_{ri})S_{i-1}$。

2）无张力定、减径时壁厚变化量。确定在无张力定、减径时决定壁厚变化的主要因素是减径程度 D_c/D_l 和来料壁厚系数 $v_l=S_l/D_l$（D_c 为成品管直径，S_l，D_l 为来料壁厚与外径，当来料为均整荒管时，则 $S_l=S_j$，$D_l=D_j$，同时和材料的性质有关（如钢种、温度和加工硬化程度等）。

图4.3-44为无张力定、减径时有加工硬化钢的管壁厚度变化曲线。由图可见壁厚变化的大致规律：$S_l/D_l<0.1$ 的薄壁管在任何减径量下都增壁；$S_l/D_l>0.35$ 时任何情况均减壁，$S_l/D_l=0.1\sim0.35$ 范围内，视减径量的大小，可能是增厚也可能是减薄。在实际生产条件下，一般 S_l/D_l 较小，同时减径量也不大，故多数无张力减径都增壁，只有当厚壁管减径时才会出现管壁保持不变或减壁。

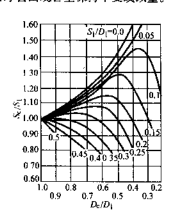


图4.3-44 无张力减径时壁厚变化值
（碳钢和合金钢管）

实际生产中可以用图 4.3-44 来确定来料壁厚 S_1，先用 S_c/D_1 代替 S_1/D_1 值，由图得到 S_c/D_1 值，即可得到 S_1 值。为了得到比较精确的结果，再由前求得的 S_1 来确定 S_1/D_1 值，重新由图求出比较精确的 S_1 值。

实际生产中也可以采用经验公式确定无张力定减径时的壁厚变化值，这些公式均在一定条件下得到，因此原始条件相似时才有一定可靠性。对于碳钢和合金钢的经验公式为

$S_c < 15$ mm 时

$$S_c = S_1\left[1 - 0.0044\,(D_1 - D_c)\right] \tag{4.3-92}$$

厚壁管时

$$S_c = S_1 - \frac{D_1 - D_c}{14.9} \tag{4.3-93}$$

另一个计算壁厚变化的经验式为

$$\Delta S = \frac{2\,(D_1 - D_c)}{D_1} + 0.2S_1 - 0.8 \tag{4.3-94}$$

3）定、减径时壁厚变化对产品质量的影响

① 定、减径时壁厚变化分布规律。以上讨论定、减径时壁厚变化值为断面上的平均值。实际上，无论是无张力定、减径时的壁厚变化，还是张力减径时的壁厚减薄，沿横向（孔型宽度上）的分布都是不均匀的，如图 4.3-45 所示。无张力或微张力定、减径时，孔型顶部 I—I 断面及其附近处的金属受减径变形而产生延伸和宽展，由于受孔型侧槽壁的限制，展宽（管壁增厚）只能向内进行，而辊缝处（Ⅲ—Ⅲ断面）的管壁处于自由“镦粗”状态，金属可向内外流动，Ⅱ—Ⅱ断面处的金属介于以上两者之间。同时，孔型顶部处的单位压力最大，辊缝处单位压力最小，Ⅱ—Ⅱ断面处介于中间状态。因此孔型顶部处金属将向辊缝部位流动，由于上述两种原因，出现壁厚增壁不均匀，在孔型顶部最小，而由 I—I 断面至Ⅲ—Ⅲ断面逐渐增大。

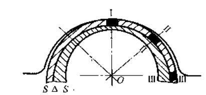


图 4.3-45　增壁量沿孔型宽度上的不均匀分布

张力减径时减壁变形的分布也是不均匀，孔型顶部处管壁减薄最大，而辊缝处减壁最小，结果也会产生轧后钢管壁厚不均。张力减径时引起沿孔型宽度上减壁量大小变化的原因主要是各处的接触长度不一，一般孔型顶部接触长度大，而辊缝处接触长度最短。这就造成轧辊孔型给于管子各部分的摩擦力大小分布不一，孔型顶部摩擦力最大，带动金属轴向延伸大，导致减壁量大，而在辊缝处则相反，结果张力减径时，实际壁厚分布与图 4.3-45 所示相似，孔型顶部壁厚最小，向辊缝处壁厚逐渐增加。

② 壁厚不均匀变化对产品质量的影响。多机架二辊定、减机相邻机架轧辊孔型辊缝位置相互垂直，即孔型顶部和辊缝位置依次垂直交替配置。因此单机架减径过程产生的壁厚不均匀增或减的变化值，将逐架累积起来，如图 4.3-46 所示。结果由图可见在孔型顶部和辊缝处壁厚最大，而在 45° 处的壁厚最小，产生新的钢管横向壁厚不均。当在减径过程中产生的壁厚不均匀变化过大时，会使钢管内孔形状成“方形”，如图 4.3-47a 所示。这缺陷称为“内方”。同例，经多机架三辊定、减径机（相邻机架辊缝互成 60°）减径后，也会产生横向壁厚不均，严重的出现“内六角”缺陷，如图 4.3-47b 所示。

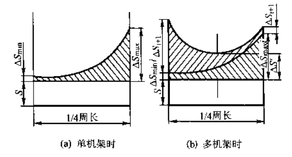


图 4.3-46　增壁量沿 1/4 周长上的分布

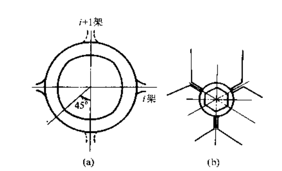


图 4.3-47　内方和内六角缺陷

③ 减小定、减径时横向壁厚不均措施。对于无张力定、减径目前有下列措施：a）采用三辊定、减径机，这是因为三辊式孔型的切槽浅，沿孔型槽宽上速度差和单位压力差小，可减轻横向壁厚不均。b）在调整定、减径机孔型时，使轧制时的钢管产生小的扭转，以使各架辊缝不固定在钢管的四点上，可减轻横向壁厚不均。c）各机架呈不同角度布置（即前、后机架的辊缝位置成某一较小的角度）/有利于减少横向壁厚不均。但此法会导致定、减径机结构复杂，故应用较少。d）采用微张力定、减径。张力促使金属的轴向延伸，有利于减小横向壁厚不均。e）控制定、减径时总的减径变形量，这是因为横向壁厚不均将随总减径变形量的增大而加大，因此实际生产中为防止减径时出现内方或内六角缺陷，规定了机组不同 S/D 值的钢管生产的最小直径。

对于张力减径，根据试验得到影响横向壁厚不均的因素有：a）S/D 值愈小，则壁厚不均愈小。当 $S/D = 0.05 \sim 0.10$ 时，几乎不出现内多角形缺陷，而当 $S/D \geqslant 0.20$ 时，内孔不圆特别显著。b）当 S/D 值较小时（0.05～1.0），张力对横向壁厚不均无明显影响，但 S/D 值较大时，张力愈大，则横向壁厚不均愈大。因此，当 S/D 值较大且采用 7% 以上的单机架减径率时，应当采用微张力轧制。c）横向壁厚不均主要产生于减径机的中、后部各机架，因为各机架的 S/D 值顺轧制方向逐渐增加，且中、后部机架中的张力也比起始机架的大。d）单机架减径率愈大，横向壁厚不均亦大。孔型椭圆度系数愈大，横向壁厚不均愈大。e）总减径率愈大，横向壁厚不均愈大。

因此，为了减轻张力减径时的横向壁厚不均，应当合理地选择单机架减径率、张力和孔型的椭圆度系数。Neuhoff 和 Biller 研究指出，张力减径时出现的横向壁厚不均还和变形区长度有关，如采选用一种变形区长度沿孔型槽宽上差值很小的孔型，可显著减轻钢管的横向壁厚不均。

4）张力减径时管端增厚



① 管端增厚原因。张力减径时，由于钢管前、后端处于张力建立和消失的两个不稳定阶段，此时钢管所受的张力比中间处于稳定轧制阶段的要小，结果造成钢管前、后端的管壁厚度比中间的略厚。使切头、切尾长度增加，金属消耗增加。这种钢管增厚是张力减径的重要缺点。

② 管端增厚长度确定。管端增厚长度（即需要切除的管壁厚度超差部分长度）一般随总变形量、机架间距、平均张力系数 Z 和轧制速度的增大而增加。但随单机架的减径率、S/D 值，轧辊理想直径、摩擦系数的增大而减短。此外合金钢管的增厚长度比碳钢的大。实际生产计算时可采用以下经验式估算：

Щебценко 公式（适用于小延伸）

$$L_c = 2C_d\sqrt{\mu_\Sigma} \tag{4.3-95}$$

式中，L_c 为切头、切尾长度，mm；C_d 为机架间距，一般 $C_d=(0.9\sim1.0)D_0$；D_0 为轧辊理想直径，mm；μ_Σ 为总延伸系数，一般 $\mu_\Sigma=2\sim2.5$。

Redder 公式（适用于大延伸）

$$L_c=(0.85\sim0.90)\left(\frac{2\mu_\Sigma C_d}{R}\right) \tag{4.3-96}$$

$$R=1-0.01\Delta S$$

式中，ΔS 为总减壁量，mm。

③减小管端增厚长度措施：a）增加单机架减径率、减小机架间距、增加钢管长度等。但这仅将增厚段长度减小到钢管全长的 8%～14%。b）采用端头厚度电控技术，即通过调整轧辊转速来增加钢管前后端不稳定状态轧制时的张力，使前、后端所受总张力与稳定阶段的张力相近，这可使管端增厚长度减少 37%～53%。c）实现无头张力减径，这是理想的办法。已在原苏联第一乌拉尔新钢管厂 ϕ30～102 连轧管机组的张力减径机上实现。

（2）定、减径和张力减径轧制力计算

轧制力计算通式为

$$P=\bar{p}F$$

1）接触面积 F 计算。钢管定、减径和张力减径时的变形区由压扁和减径区组成。考虑压扁区对轧制力的影响，Щебценко 提出变形区长度 L_i 和接触面积 F_i 按下式计算。对二辊式定、减径机

$$L_i=(0.8\sim0.85)\sqrt{0.5(b_{i-1}-a_i)[D_{gmin}-0.5(b_{i-1}-a_i)]} \tag{4.3-97}$$

$$F_i=(0.8\sim0.85)b_i\sqrt{0.5(b_i-a_i)[D_{gmin}-0.5(b_{i-1}-a_i)]}$$

式中，b_i、b_{i-1} 为该架和前一架的孔型宽度，mm；a_i 为该架的孔型高度，mm；D_{gmin} 为该架孔型顶部的轧辊直径，mm。

对三辊式定、减径机

$$L_i=(0.9-0.95)\sqrt{(b_{i-1}-a_i)[D_{gmin}-(b_{i-1}-a_i)]} \tag{4.3-98}$$

$$F_i=B_iL_i=\sqrt{3}b_iL_i$$

式中，b_i、b_{i-1} 为该架和前一架孔型长半轴长度，mm；a_i 为该架孔型的短半轴长度，mm；B_i 为该架金属与轧辊平均接触宽度，mm。

2）平均单位压力 $\bar{p}$ 确定。平均单位压力 $\bar{p}$ 按下式计算：

$$\bar{p}_i=n_f n_1 n_q\frac{2S_{i-1}}{D_{i-1}}K \tag{4.3-99}$$

式中，K 为变形抗力，MPa，$K=1.15\sigma_s$；σ_s 为金属的屈服极限，MPa；S_{i-1} 为前一架减径后钢管壁厚（即轧前钢管壁厚），mm；D_{i-1} 为前一架减径后钢管直径（等于前架孔型得平均直径），mm；n_f 为外摩擦对 $\bar{p}$ 的影响系数，见图 4.3-48；n_1 为外区对 $\bar{p}$ 的影响系数，$n_1=1+0.9\frac{\sqrt{D_{i-1}S_{i-1}}}{L_i}$；$n_q$ 为张力对 $\bar{p}$ 的影响系数，$n_q=1-\left(\frac{1}{3}Z_i+\frac{2}{3}Z_{i-1}\right)$；$L_i$ 为该架变形区长度，按式（4.3-97）或式（4.3-98）计算；Z_i、Z_{i-1} 为该架前、后张力系数。

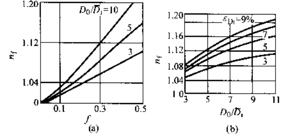


图 4.3-48 确定 n_f 值的曲线图

ε_{D_i}—i 机架减径率，%；D_0—轧辊名义直径；$\bar{D}_i$—i 机架孔型平均直径

定、减径机上的轧制力一般都不大，约波动在 200～300 kN之间，并以成品机架之前 1、2 架轧制负荷最大。二辊式或三辊式张力减径机的轧制力都是在咬入初期具有最大值，当钢管充满 3～4 架后轧制力达到稳定。当钢管尾端开始离开时又出现轧制压力增大的情况，这是由于张力和壁厚变化引起的。

影响定、减径时轧制力大小的因素有：钢管壁厚、变形抗力、平均张力系数、轧辊直径和单机架减径率 ε_{D_i} 等。对张力减径来说，平均张力系数对轧制力的影响最大。

4.8 连轧管机组

（1）全浮动芯棒连轧管机轧制特点

1）变形特点。连轧管机是带长芯棒多机架钢管纵轧机，因此它可随着减轻前架轧制过程中带来的横向壁厚不均，而获得壁厚均匀的荒管。但是连轧管机每架轧制，孔型顶部的金属受压缩而产生轴向延伸和向圆周宽展；孔型侧壁部分的金属不与芯棒不接触，但受孔型顶部轴向延伸的金属对它的附加拉应力作用，而产生轴向延伸和周向拉缩。因此，只有当顶部金属的宽展与侧壁部分金属的拉缩保持一定关系时，才能保证孔型的正常充满。

根据塑性理论，当 $\sum P_1=\sigma_1A+\sigma_1'A'=0$ 时，孔型正常充满；当 $\sum P_1>0$，时，发生过充满；当 $\sum P_1<0$ 时，发生欠充满（式中 σ_1 和 A 为孔型顶部金属的轴向压应力和金属的断而积，σ_1' 和 A' 为孔型侧壁部分金属的轴向拉应力和金属的而积，见图 4.3-49）。过充满会引起耳子、飞翅，一个机架的过充满会引起其随后机架过充满的连锁反应；一个机架的欠充满也会引起其后机架的连锁反应，使荒管断面成四角形或八角形。因此连轧管工艺过程最佳情况是 $\sum P_1=0$。

2）运动特点。连轧管过程中为保持各架金属秒流之间的连轧关系，须逐架改变轧辊转速外，芯棒的运动速度随轧制过程也将发生变化，而芯棒速度的变化又将给金属的速度与变形带来影响。

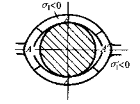


图 4.3-49 孔型中金属的轴向应力分析

连轧管机轧管时，芯棒在轴向仅受轧件作用的摩擦力。面处于全浮动状态芯棒（图 4.3-50），其任何一时间的运动速度 v_t 等于同处于轧制状态下的各架金属速度的平均值即

$$v_t = \frac{P_1 v_1}{\sum_1^n P_i} + \frac{P_2 v_2}{\sum_1^n P_i} + \cdots + \frac{P_n v_n}{\sum_1^n P_i} \quad (4.3\text{-}100)$$

式中，v_t 为芯棒运动速度；$P_1 \sim P_n$ 为在 1～n 架中的轧制力；$v_1 \sim v_n$ 为在 1～n 架中金属的出口速度。

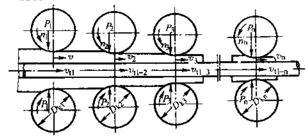


图 4.3-50 连轧管时毛管和芯棒速度

v_{t1}、v_{t1-2}、…v_{t1-n} 表示芯棒前端（图中虚线）经过各架的芯棒速度

由于连轧管机各架的金属速度逐架升高，而芯棒是一刚体，在某一时刻只能有一个运动速度。因此，在芯棒和金属整个接触长度上存在一个芯棒速度与金属速度一致的面，称为芯棒中性面。在芯棒中性面到入口侧，金属速度低于芯棒速度（即金属后滑）；而芯棒中性面到出口侧，金属相对于芯棒前滑。

连轧管机整个轧管过程可分以下三个阶段：①咬入阶段。毛管依次在第一架、1～2 架间、1～3 架间……1～n 架间轧制，建立起连轧管过程。此阶段芯棒运动速度随各架咬入跳跃性地增大（图 4.3-51），与此同时，心棒中性面位置也往出口方向跳跃移动。②稳定轧制阶段。连轧管过程建立，心棒速度处于稳定状态，而中性面处于某一稳定位置。③抛钢阶段。毛管尾端开始逐架离开各架，形成 2～n 架间、3～n 架间……至 n 架轧制。此时因金属平均速度随毛管的离开面增加，故芯棒运动速度也跳跃性增加，中性面原稳定位置向出口侧移动。

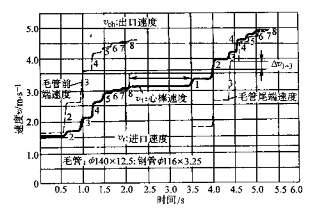


图 4.3-51 连轧管时金属速度与芯棒速度的变化

由于连轧过程中存在金属与芯棒相对滑动，引起沿芯棒长度方向上摩擦力分布不一，而摩擦力的变化对轧管时的金属变形有以下影响：①芯棒摩擦力给变形区内的金属内表面切向应力，有利于金属的延伸变形，而使毛管的横截面减小，但由于各架金属与芯棒间的相对滑动速度不同，摩擦力大小不同，结果横截面减小程度不同。②摩擦力作用造成金属挤向芯棒中性而，使该截而面积增加。③摩擦力使芯棒中性面处压应力状态增加，轧制力增加，轧机弹跳增加，面使轧后断面增大。与此相反，在芯棒中性面两边的机架中因心棒与金属的相对滑动增加，而轧制力减小。综合上述因素结果，芯棒中性面处的轧件断面将比设定的值有所增加。显然在稳定轧制阶段，由于毛管上各截面通过芯棒中性而的机遇相同，反映在轧后荒管上断面尺寸一致。而在咬入和抛钢阶段，由于芯棒中心面位置的变化，使毛管各截面通过中性面的几率不同，几率大的截面轧后断而尺寸大（壁厚与外径大），结果造成连轧管轧制时出现的“竹节”缺陷。

3）张力对连轧管过程的影响。连轧管时，各架间的速度关系对金属在孔型中的变形特点有重大的影响。张力轧制有助于金属的延伸变形，但因横向变形减小，易使管于抱芯棒，给脱棒造成困难；而推力轧制不利于金属的延伸变形，增加横向变形使荒管横向壁厚不均，易使荒管呈“竹节”形状。因此，理想的连轧管过程应是无张力、无推力自由状态的连轧方式，但由于连轧管存在长芯棒，则不能用产生活套的方法来协调各架间的金属秒流量关系；另外，由于孔型内存在不均匀变形会导致带于扰性的纵向张力的产生。因此，要使各架金属的秒体积流量恒定不变是困难的。在现代连轧管机中，由第一架至最后机架张力逐渐减小，并过渡到推力轧制，即前几架（1～3）采用 0.5%～1%张力（指运动学上的张力），中间机架采用 0.5%～0%张力，已保证轧制过程稳定而又不将芯棒包得太紧。后几架采用 0～1%的推力以利于脱棒。

4）连轧管机咬入条件。连轧管机的咬入条件主要取决于第一架的咬入条件，当第一架正常实现咬入，其他各架必能实现咬入。连轧管第一架的咬入条件也分一次、二次咬入条件。一次咬入条件按式（4.3-76）计算，二次咬入条件为

$$\tan\alpha_2 < \frac{2f - \tan\alpha}{1 + 2f\tan\alpha} \quad (4.3\text{-}101)$$

式中，α 为咬入角，(°)；f 为金属与轧辊间的摩擦系数；α_2 为减壁角，(°)。

5）轧制力计算，可按 4.6 第（1）节介绍的方法，对于第一架的减壁区面积 F_2 为

$$\left.\begin{aligned} F_2 &= a_1 l_2 \\ l_2 &= \sqrt{(S_m - S_{a1})\left[(D_0 - a_1) + S_m + S_{a1}\right]} \end{aligned}\right\} \quad (4.3\text{-}102)$$

式中，b_1、a_1 为第一架孔型高及宽度，mm；S_{a1} 为第一架孔型底部管子壁后，mm；l_2 为减壁变形区长度，mm。

对于第二架及以后各架的接触而积按下式近似计算：

$$F_2 \approx \frac{2}{3} l_{0i} a_i$$

式中，l_{0i} 为该架按孔型顶部计算的变形区长度，mm；a_i 为该架孔型宽度，mm。

（2）全浮动芯棒连轧管机的孔型设计

1）连轧机孔型种类。连轧管机的合理孔型设计必须保证具有高的生产率、荒管尺寸精度高和表面质量好、脱棒容易及孔型磨损均匀等。连轧管机上采用的孔型有椭圆孔型、带切线侧壁的圆孔型、带圆弧侧壁的圆孔型和棱面孔型等，如图 4.3-30 所示，其中常用的是前三种孔型。单半径椭圆

孔型有利于金属横向变形造成荒管与芯棒间隙，便于脱棒。另外孔型磨损后可通过调整继续使用。但荒管的壁厚不均较大，适宜用于延伸系数较大的毛轧机架。带圆弧侧壁的圆孔型对金属的横向变形限制作用大，壁厚不均较小，孔型磨损均匀，允许采用小减径量轧制毛管，延伸系数大，但脱棒不容易。带切线侧壁的圆型对金属横向变形有限制作用，壁厚不均较椭圆孔型小，也用作毛轧孔型。圆孔型（或小开口角的圆孔型）用作成品孔型，变形量小，以提高荒管的尺寸精度。

2）连轧管机孔型设计步骤

① 选定孔型系统。目前，椭圆、椭圆－圆和圆孔型系统均有应用。为了提高荒管精度，似乎趋向使用圆孔型系统（图4.3-52）。

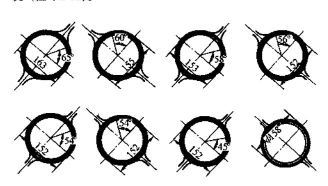


图4.3-52 连轧管机组孔型系统

② 计算总变形量和分配各机架的变形量。总减壁量 ΔS_z 和总延伸系数 μ_z 为

$$\left.\begin{aligned}\mu_z &= F_m/F_z = (D_m - S_m)\,S_m/(D_z - S_z)\,S_z\\ \Delta S_z &= S_m - S_z\end{aligned}\right\}\quad(4.3\text{-}103)$$

式中，F_m、D_m、S_m 分别为毛管横断面积、外径和壁厚；F_z、D_z、S_z 分别为轧后荒管横断面积、外径和壁厚。

各机架变形量分配满足以下关系式

$$\left.\begin{aligned}&\mu_z = \mu_{z1}\mu_{z2}\mu_{z3}\cdots\mu_{zn}\\ &\Delta S_z = \Delta S_{z1} + \Delta S_{z3} + \Delta S_{z5} + \Delta S_{z7}\\ &\text{或}\ \Delta S_z = \Delta S_{z2} + \Delta S_{z4} + \Delta S_{z6} + \Delta S_{z8}\end{aligned}\right\}\quad(4.3\text{-}104)$$

式中，μ_{z1}，μ_{z2}，…，μ_{zn} 为第一架到 n 架的延伸系数；ΔS_{z1}，ΔS_{z3}，…，ΔS_{zn} 为第一架到 n 架孔型顶部的减壁量（不考虑轧制过程中孔型开口处的壁厚变化）。

图4.3-53和图4.3-54分别是 ϕ140机组8机架连轧管机变形量分配曲线和 $\phi30\sim\phi102$ 机组9机架连轧管机变形量分配线，以此作为示例。

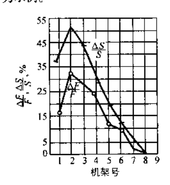


图4.3-53 8机架连轧管机变形量分配曲线

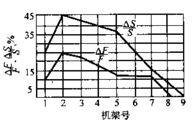


图4.3-54 9机架连轧管机变形量分配曲线

③ 计算各架孔型顶部和开口处管壁厚度，为简便近似认为孔型开口处的壁厚轧制前后不变，则

$$\left.\begin{aligned}&S_{z1} = S_m - \Delta S_{z1};\ S_{z3} = S_{z1} - \Delta S_{z3};\ S_{z5} = S_{z3} - \Delta S_{z5}\cdots\\ &S_{z2} = S_m - \Delta S_{z2};\ S_{z4} = S_{z2} - \Delta S_{z4};\ S_{z6} = S_{z4} - \Delta S_{z6}\cdots\end{aligned}\right\}\quad(4.3\text{-}105)$$

式中，S_{z1}、S_{z2}、$S_{z3}\cdots S_{zn}$ 为各架孔型顶部壁厚。

④ 确定各架孔型高度 b_i 为（图4.3-55）

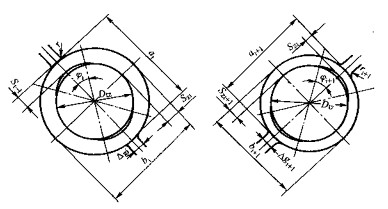


图4.3-55 连轧管机孔型尺寸确定图示

$$b_i = D_{tz} + 2S_{zi}\quad(4.3\text{-}106)$$

式中，D_{tz} 为芯棒直径；b_i，S_{zi} 为该架孔型高度和孔型顶部壁厚。

⑤ 确定各架孔型宽度 a_i。$a_i = \xi_i b_i$。式中的孔型椭圆度系数 ξ_i 应从方便脱棒和壁厚精度两方面考虑，当 $\xi < 1.25$ 时，不均变形和横向壁厚不均较小。但荒管包芯棒紧不易脱棒。$\xi > 1.25$ 时，脱棒容易，但壁厚不均大。因此，第1～2架由于壁厚大，不易包芯棒，为提高壁厚均匀性，取 ξ = 1.2～1.25；第3～5架采用自由宽展孔型以便脱棒，取 ξ = 1.25～1.30；第6～7架是成壁孔型，为提高壁厚精度和不使管子包芯棒太紧，取 ξ = 1.24～1.25；最后两架为1.02～1.06以提高荒管真圆度。同时为了保证第一架的咬入，其孔型宽度为 b_1 =（1.025～1.03）D_m。

⑥ 确定孔型其他尺寸。开口角 φ 第1架取45°～50°，2～6架取 φ = 40°～45°，最后两架取 φ = 30°。辊缝 Δ_g 第1架取8 mm，其他各架取4 mm。槽口圆角半径 r 前几架取

20 mm，后几架取 5～15 mm。

⑦ 绘制孔型图，计算各孔型管子面积。

⑧ 校核各架孔型的延伸系数，如接近设定值，则可用，否则应进行修正。

(3) 全浮动芯棒连轧管机的芯棒

1) 芯棒尺寸。芯棒直径 D_{tz} 为：

$$D_{tz} = D_z - 2S_z - \Delta \text{ 或 } D_{tz} = d_m - \Delta_m \quad (4.3\text{-}107)$$

式中，Δ 为芯棒与荒管内孔间隙（脱棒间隙），一般为 1～3 mm；Δ_m 为芯棒与毛管内孔间隙（插棒间隙），一般为 3～8 mm。

由全浮动芯棒连轧管机运动特点可知轧制过程中芯棒运动速度 v_t 小于连轧管机末架荒管的出口速度，因此芯棒工作部分长度 L_0 可以小于轧后荒管的最大长度 L_{zmax}（$= L_{mmax} \cdot \mu_z$），由 В.Г.Балака 等推荐公式确定 L_0 为

$$\left.\begin{aligned} L_0 &= L_{mmax}\mu_z - \Delta L \\ \Delta L &= \frac{\mu_z - 1}{2}\left[L_{mmax} - \frac{A\ (n-1)}{\mu_z + 1}\right] \end{aligned}\right\} \quad (4.3\text{-}108)$$

式中，ΔL 为荒管从芯棒前端滑出的长度，mm；L_{mmax} 为毛管最大长度，mm；μ_z 为连轧管机的总延伸系数；A 为连轧管机机架间距，mm；n 为连轧管机机架数目。

为保证在芯棒抽出机上有夹住芯棒的操作条件，芯棒全长应比 L_0 放大 1.5～2 m。

2) 芯棒材质和加工制造工艺。目前各国用来制造全浮动芯棒连轧管机的芯棒材质大多数是含碳 0.3%～0.4%、铬 4.0%～6.0%、钼 1.5%～0.5% 和含少量钒的铬钼圆钢。经粗车、精车（直径车去 2～4 mm）后经滚压或矫直，并用磨床或砂轮磨磨机抛光，再进行调质处理和最终矫直。芯棒加工精度一般为 ±0.05 mm，表面粗糙度为 R_a1.6 μm，淬火层厚度为 5～10 mm，热处理后硬度为 55～60HRC。芯棒一般可返修 2～3 次或 4～5 次，总轧出量 12 000 根荒管左右。抽出心棒采用水冷，为防止急冷时出现表面龟裂，应当控制冷却水温度（70～80℃）。

3) 芯棒润滑。在连轧管过程中，芯棒的润滑具有重大意义，它可促使金属变形均匀、降低能耗、减小荒管的横向壁厚不均、改善荒管内表面质量并可提高心棒寿命。对芯棒润滑剂的要求是减摩性好、有良好的附着力、易于涂抹、与金属不起反应和资源丰富、无害。

目前，国外应用的润滑剂有水溶性石墨油（含水53%±3%）、石墨溶液（石墨 20%，高分子聚合物 15%，其余水）和重油与石墨混合剂（油与石墨比例 10:1）等。润滑剂涂在经预热（250～300℃）的芯棒上，涂层厚度为 0.2～0.3 mm。芯棒温度过低时润滑剂涂抹不均匀，而温度过高又使润滑剂容易剥落。有些工厂不专门进行芯棒预热，而是靠控制轧制温度和芯棒冷却来保证涂润滑剂时，芯棒有 250～300℃温度。

(4) 全浮动芯棒连轧管机各架速度配置

若不考虑芯棒运动速度对金属运动速度的影响，则各架轧辊转速按下式计算：

$$n_{gi} = \frac{D_{k(i+1)}\, n_{g(i+1)}}{D_{ki}\mu_{z(i+1)}\, C_{i+1}} \quad (4.3\text{-}109)$$

式中，n_{gi}、$n_{g(i+1)}$ 为前架和后架（按轧制方向）的轧辊转速，r/min；D_{ki}、$D_{k(i+1)}$ 为前架和后架轧辊工作直径，mm，其值为 $D_{ki} = D_{gi} + \Delta_{gi} - \lambda_i b_i$；$\lambda_i$ 为确定轧辊工作直径的系数，由图 4.3-56 查得；D_{gi}、b_i、Δ_{gi} 为该道轧辊直径、孔型高度和辊缝值，mm；$\mu_{z(i+1)}$ 为后架孔型中的延伸系数；$C_{(i+1)}$ 为后架选用的运动学张力系数。通常第 1～3 架为 1.01～1.005，中间机架为 1.005～1.0，最后几架为 1.0～0.99。由第 1 架至最后机架逐渐减小。

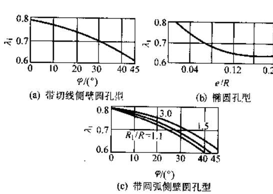


图 4.3-56 确定各种孔型的 λ_i 值曲线

根据连轧管机技术性能、钢管品种和机组生产率的要求，选定连轧管机进口或最末架轧辊转速，即可按式（4.3-109）求出各架轧辊转速。

实际上，芯棒运动速度虽然由各架金属速度所决定［式（4.3-100）］，而芯棒运动速度又反过来影响各架金属的速度。根据 K.Neuhoff 和 G. Pfeiffer 的假设，各架管子的出口速度为轧辊工作圆周速度和芯棒速度的平均值，即

$$v_i = \frac{v_{gi}f + v_t f_t}{f + f_t} \quad (4.3\text{-}110)$$

式中，v_i、v_t 为 i 架管子出口速度和芯棒速度，m/s；v_{gi} 为 i 架轧辊工作圆周速度（按工作辊径计算），m/s；f_t、f 为金属与芯棒和轧辊间的系数。f 按一般热轧公式计算。f_t 视润滑条件、芯棒温度和速度以及延伸系数而定，一定为 0.02～0.08。

为了较精确设定好各架轧辊转速，可先按式（4.3-109）计算公式各架轧辊转速 n_i，由 n_i 得到各架管子的出口速度。由式（4.3-100）得到芯棒速度 v_t，即可按式（4.3-110）得到较精确的各架的 v_i。最后再按 v_i 计算各架轧辊转速 n_i。

如前所述，连轧管过程中，由于芯棒运动速度影响着各架管子的出口速度，毛管进入和离开各架时，将导致各架管子的加速。在一个轧制周期中，管子在有几个机架的连轧管机中，出现 $2n-1$ 个轧制状态，每一机架管子的出口速度，在轧辊转速不变的情况下，发生 n 次变化。这种值离设定速度和荒管头尾不受张力的作用，使荒管头尾管壁较厚，并在相对应速度变化处出现“竹节”现象，而增加金属消耗。

为了改变这种情况，德国和日本都采用了管端增厚电控技术，它的基本点是装设一套附加电控装置，使前三架的传动在毛管通过时产生动态校准，使各架管子出口速度按式（4.3-110）保持不变，从而显著减轻了“竹节”现象。前苏联则采用机械方法控制荒管头尾增厚，即管子头尾通过倒数 2～3 架时，临时加大压下量，当管子中部通过时恢复正常状态。这种方法使头尾增厚限制在 0.15～0.2 mm 范围内。

(5) 限动芯棒连轧管工艺

目前广泛采用的 6～8 架限动芯棒连轧机组是 20 世纪 70 年代发展起来的。当时对 φ177.8、φ139.7、φ244.5、φ340.0 mm 石油套管和输送管的需求急剧增长。而生产这一尺寸范围的钢管，是浮动芯棒工艺不能胜任的。

限动芯棒连轧工艺从 1964 年意大利达尔明（Dalmine）公司的轧制试验起，到 1978 年帕尔马（Bergemo）厂 MPM 轧机的投产止，历经 15 年的发展过程。意大利茵西（INNSE）



公司称其为 MPM 工艺。1976 年曼内斯曼－德马克公司在 Lintort 的研究所分析了意大利茵西公司的试轧结果，在此基础上又进行了试验，并将它的限动芯棒连轧工艺称之为 MRK－AR 工艺。其中“AR”中的“A”表示采用脱管机，“R”表示芯棒抽回。采用这种工艺轧管，连轧管外径最大可达 ϕ406 mm（16 in），最佳尺寸为 ϕ339.7 mm（13 3/8 in）。该工艺的实质是：在整个轧制过程中，控制芯棒运动速度，使其保持恒定；借助于脱管机，在轧制过程结束时，将芯棒从荒管中抽出，使其与芯棒装置一起返回。为尽量减少辅助时间，MPM 工艺和 MRK－AR 工艺均采用芯棒预装方式，所轧荒管的最大长度为 48 m，芯棒长度小于 30 m。

1）MPM 工艺设备特征

① MPM 轧机的特征。MPM 轧机采用机械限动式芯棒速度控制装置。芯棒的快速动作（穿芯棒、抽芯棒）及限动动作（轧制时控制芯棒速度）靠 36 m 长的大齿条来实现。快速动作由两台 500 kW 直流动电机分别驱动两个齿轮，从齿条的上下侧带动齿条运动。作限动动作时，由 8 个齿轮（上下各 4 个）从齿条的上下侧带动齿条运动，每个齿轮均由 1 台 110 kW 直流电动机单独传动。芯棒运动方式的改变依靠气动离合器分别接通或脱开相应的齿轮来实现。芯棒的快速行程速度为 6 m/s，限动速度为 0.2～0.5 m/s，限动工作行程为 5.0～5.2 m。

在 Dalmine 公司进行试验时，芯棒的运动速度采用液压控制。但因液压系统控制芯棒速度不够稳定，有芯棒断续运动的情况，随后改为齿轮齿条传动的机械系统。

MPM 的轧辊孔型采用比普通连轧管机开口角稍小的封闭式圆孔型（带弧形开口），可以采用较大的延伸率。

② 脱管机的特征。MPM 的脱管机与二辊式定径机相同。由于 MPM 主轧机的第 7、8 机架的压下量很小，仅靠第七八机架轧辊的作用无法推送管子前进和使管子从芯棒前端脱出，故在 MPM 工艺中设置 3 架脱管机，起脱管和定径的作用。脱管机的轧辊直径为 720～850 mm，辊身长 420 mm，第一、三架由 1 台 450 kW 的直流电动机驱动，而第 2 架则单独由 1 台同型号电机驱动。脱管速度必须按连轧原则确定，并与 MPM 轧机的第 8 机架保持电气联锁。脱管机的减径率为 3.5%～4.6%，孔型与一般二辊式定径机相同。

③ MPM 工艺的芯棒特征。轧制过程中，要控制芯棒的速度，使其处于恒定状态。虽然芯棒也随管子前进，但其前进速度应远小于管子的速度，轧制结束后被抽出返回。缩短芯棒的长度，如轧制 28 m 长的管子，芯棒长度仅 12 m。芯棒为中空水冷芯棒，轧制结束后，芯棒温度约 400℃，需要采用内外喷水均匀冷却。

2）MRK－AR 工艺特征。曼内斯曼－德马克公司在意大利限动芯棒连轧工艺试验结果的基础上作了如下改进：

① 降低延伸系数。意大利 MPM 轧机的延伸系数为7.0～7.5，而曼内斯曼－德马克公司仅采用 4.0～4.5 的延伸系数。

② 提高芯棒限动速度，改善工具的受热状况。

③ 增大芯棒行程。意大利 MPM 轧机开始轧管时，芯棒前端处于第六机架，而 MRK－AR 工艺芯棒处于第三四机架。这样，芯棒行程增大，有利于负荷的降低。

在成品管单位重量相同的情况下，MRK－AR 工艺的产量比 MPM 工艺的高。这种工艺虽有技术性报道，但未见工艺性装置投产的报道。

3）MPM 轧管工艺的基本理论知识。采用液压传动使得芯棒在整个轧制过程中速度保持恒定，排除了金属流动的非连续性。按照秒流量不变的原则使轧辊线速度与轧件的面积减缩相适应，使得相邻机架间不产生张力。同时，排除了沿管子长度方向壁厚与直径的变异，消除了“竹节”现象。由于从第一架起就使芯棒速度保持恒定，低于轧件的速度范围，因此避免了交变的轧制状态和在连续轧管机中所出现的巨大的单位轧制压力。由于消除了金属非连续性流动和轧制状况周期性变化的现象，所以可以采用封闭式的圆孔型。由此使金属变形趋于均匀，单位功率消耗大大降低，并简化了芯棒抽出的工艺过程。

封闭式圆孔型的采用以及由此而获得的均匀变形，使得 MPM 轧管工艺的总延伸系数可保持在 10 以上。与全浮动式连续轧管工艺相比，这意味着 MPM 工艺可以采用壁厚更厚的空心坯和更高的始轧温度。由于始轧温度的提高，钢的变形抗力和摩擦力下降，因此单位轧制力也就降低。此外，芯棒与轧件之间具有较高的相对速度，这更有利于摩擦力与单位轧制力的降低。MPM 轧管工艺比全浮动式连续轧管工艺的轧制力约降低 40%～50%，轧辊直径与辊颈尺寸可大大减小，管坯和芯棒的接触弧缩短。如轧制 ϕ92 mm×3.5 mm 的管子时，MPM 工艺的延伸系数为 6.22，平均单位功率消耗为 16 kWh/t；而全浮动式连续轧管工艺的延伸系数仅为 4.5，平均单位功率消耗就达 36 kWh/t。

由此可以认为，用 MPM 工艺可以轧制难轧的高合金钢，所轧制的管子直径、壁厚公差较理想，设备投资更少。

4）PQF 三辊式限动芯棒连轧新工艺。二辊式限动芯棒工艺在生产 ϕ325～ϕ426 mm 大口径薄壁管时，仍存在难以克服的困难，即孔型底与辊脊速度相差太大，因此用二辊式限动芯棒 MPM 工艺也不能适应大口径薄壁管。采用三辊轧机可减少孔型底与辊脊速度差，从而大幅度降低了轧辊孔型在轧制相同外径时的壁厚公差。PQF 工艺轧制道次少，变形更均匀，因而金属横向流动减少，芯棒与轧辊上承受的峰值压力降低较多，芯棒在轧制过程中的稳定性增加，因而工具消耗降低，事故减少。此外，采用三辊轧机，钢管表面更光洁，并可轧制合金含量更高的钢种，及 $D/S \geqslant 42$ 的薄壁大口径管。另外，荒管横截面上与纵向温度更为均匀，金属组织的晶粒度细小。上述优点及其独特的短流程，可与焊管生产进行竞争。

表 4.3-3 示出了 ϕ426 mm MPM 机组与 PQF 连轧机的性能比较。如果将三辊式连轧管工艺移植到生产 ϕ177.8～ϕ325 mm 无缝钢管领域，其效果可能更好。但是，二辊式 MPM 机组已有 12 套以上，此类设备投资又大，不能因技术原因而改变，主要由市场决定。

表 4.3-3　ϕ426 mm MPM 机组与 PQF 连轧机组比较

工艺参数	MPM	PQF
机架数量	7（俄罗斯）	6（设计值）
机架长度	长	短
基础深度	深	浅
轧制力/kN	10 500	5 500
轧辊速度差	大	小
所需芯棒支数	287	154
可轧钢管 D/S 值	48.7～49.0	46.7～53.3
生产潜力	小	大
尾端缺陷	有	无
设备重量	重	轻

5）单机座（统一机座）少机架限动芯棒连轧工艺。目前世界上这种轧机仅有 2 台，由意大利 INNSE 公司制造，一台于 1993 年在南非托萨厂投产，生产 ϕ25.4～ϕ168 mm×4～20 mm 钢管，年产量为 7.5 万 t；另一台为包头钢铁公司设计



的，于1998年投产，生产 $\phi60.3\sim244.5$ mm×（4～20）mm钢管，年产量20万t。

20世纪80年代至90年代初，当适合大批量生产的连轧机组投产30余套以后，世界无缝钢管市场趋于饱和，年产40万t以上的生产大中直径钢管的限动芯棒连轧机组失去了市场。首先，阿根廷希德尔卡厂 $\phi244.5$ mm MPM机组与日本NKK$\phi445$ mm MPM机组寻找新的厂主，以便迁出国外。而产量为10～20万t/a的、较灵活的、投资较少的、适应小型市场需求的机组受到欢迎，尤其是在发展中国家。因此，新型、改良型的CPE、带快开式三辊轧管机组、Accu－Roll精密轧管机组等应运而生。限动芯棒连轧机组的开拓者们为了抢占这些分散的、小批量的零星市场，为了与其他小型灵活的机组竞争，在MPM的基础上，推出了一种单机座、少机架的SL－MPM（或称MINI－MPM）机型，企图通过减少总延伸系数，减少1～2个机架、缩小机组长度与简化结构，有限的减少产品外径规格；但是，改进后机组产量降低较多。虽然在技术上有所改进，但实际上是一种被迫采取的减少产量的MPM"亚型"工艺。它不能减少辅助时间所占的比例，速度较慢，产量相对MPM下降1/3，且仍轧中等外径管，投资节约有限。

（6）半浮动芯棒连轧管工艺

半浮动芯棒轧制工艺是介于浮动与限动工艺之间的一种"亚型"工艺。其设计思想同限动工艺，即为了减少轧制"竹节"与"鼓肚"缺陷，提高产品质量；但由于限动工艺在生产中、小直径钢管时，产量太低，经济效益差，故采用了在第四架轧机放开芯棒，并在后台脱棒，以适当提高小时产量的一种尝试工艺。

曼内斯曼－德马克公司称半浮动芯棒连轧工艺为MRK-S工艺，其中"MRK"为新连轧工艺即芯棒速度受控的连轧工艺，"S"表示此工艺仍需脱棒机。采用这种工艺时，连轧管外径最大可达 $\phi177.8\sim194$ mm。该工艺的实质是：在轧制过程中，控制芯棒的运动速度，而当轧制过程临近结束时，芯棒移动装置中的芯棒卡头将芯棒释放，使芯棒和荒管一起向轧机的轧制方向运动，直至脱棒机将芯棒抽出为止。

日本新日铁公司对全浮动和半浮动芯棒连轧工艺的对比研究指出，半浮动连轧工艺具有一系列优点：如不需要"竹节"控制装置；可以采用圆孔型；可采用较大的延伸系数；所轧管子的外径、壁厚的纵向偏差小；每个机架轧制时的负荷变化不大；芯棒长度短等。半浮动连轧工艺存在的问题是：成品管外径不可能达到 $\phi406.4$ mm。因此，在筹建八幡厂中径管厂时，采用新的自动轧管机组，同时准备采用半浮动芯棒连轧工艺，以生产较小直径（$\phi177.8$ mm）的管子。另一方面，曼内斯曼－德马克公司在对MPM轧管工艺进行分析研究的基础上，着手研究芯棒速度受控的半浮动芯棒连轧工艺，并获得成功。这就导致1981年3月新日铁和曼内斯曼－德马克公司签订合同，由后者提供半浮动芯棒连轧管机组的设计、制造技术，由三菱重工进行设备制造。由此可见，半浮动芯棒连轧工艺在工业应用方面已趋成熟。

1）半浮动芯棒连轧工艺及设备特征

① 基本工艺。空心坯经预装芯棒后进入轧制中心线，然后芯棒被固定在大齿条传动的芯棒移动装置的卡头中，在轧制过程中芯棒移动装置给芯棒以恒定的速度。当空心坯后端部离开第四机架时，芯棒移动装置将芯棒从卡头中松开，芯棒的速度增大，最后与空心坯一起离开轧管机。

② 半浮动芯棒连轧工艺的特征。a）采用芯棒移动装置控制芯棒速度，并在一定时刻释放芯棒。b）由于芯棒释放后的流程和全浮动芯棒连轧工艺相同，故仍采用脱棒机。c）半浮动芯棒连轧管机为七机架式，与全浮动芯棒的连轧工艺相比，其成品管外径增大，而装机容量反而降低约20%。

2）质量及产量指标　a）壁厚偏差。当管坯加热时的温度偏差为15 K时，采用MRK－S工艺轧管，其连轧管的壁厚偏差为±6.7%；当温度偏差为30 K时，壁厚偏差为±10%。各变形阶段壁厚偏差的变化状况见表4.3-4。b）产量指标。MRK－S连轧机组的产量水平约为经典式轧管机组的3倍。表4.3-5为几种工艺的产量水平比较。

表4.3-4　MRK－S工艺轧管时壁厚偏差

规格/mm	15 K时的壁厚偏差		30 K时的壁厚偏差	
	壁厚差/mm	偏差/%	壁厚差/mm	偏差/%
空心坯 $\phi280\times18.5$	0.6	3.25	0.9	4.9
空减后空心坯 $\phi224\times19.5$	0.6	3.1	0.9	4.6
连轧管 $\phi190\times6$	0.4	6.7	0.6	10.0
成品管 $\phi73\times5.5$	0.3	5.45	0.5	9.1

表4.3-5　几种工艺的产量水平比较

轧管工艺	毛管最大长度/m	节奏时间/s	轧制速度/m·min⁻¹
周期轧管工艺	30	45	40
顶管工艺	14～16	15	60
自动轧管工艺	10～15	30	30
挤压工艺	～25	20	75
全浮动芯棒连轧工艺	20～30	10～15	120
MRK－AR	48	24	120
MRK－S	48	17	170

3）八幡厂的连轧管车间。该车间采用MRK－S工艺，即半浮动芯棒连轧工艺，1983年投产，主要生产套管、油管、输送管。可生产外径规格为 $\phi33.4\sim193.7$ mm，壁厚为3～30 mm的无缝钢管，年产量为90万t。

半浮动芯棒连轧工艺和限动芯棒连轧工艺的共同特点是对芯棒运动速度加以控制。控制芯棒运动速度的主要优点是：a）芯棒的相对长度（对连轧管长度而言）约减少35%。b）提高芯棒在第一机架中的速度，避免了氧化铁皮在第一机架中的集聚。c）在一定程度上改善了第一机架的咬入条件。d）限动芯棒连轧管机和半浮动芯棒连轧管机的生产能力远远超过其他机组，当所轧管子的单重（kg/m）较大时，年产量可达100万t。

综上所述，连轧管工艺的发展使其在成品管质量、产量、规格等方面占有优势，特别是半浮动、限动芯棒连轧工艺的发展，使其比其他工艺更具优势。

（7）连轧管先进的工艺过程自动控制

1）液压小舱控制系统。在国外，主要是INNSE设计的限动芯棒连轧管厂自1993年起采用了液压小舱控制系统（HCC）。HCC系统在当今投产的大口径MPM轧管机组上也得到了应用。计算机技术在当代轧管技术上的应用离不开HCC系统，它既能定位——位置动作，又能施力——力能动作，可在轧管过程中调整轧管工具，反应快，调节精度高，解决了思路敏捷（计算机）和四肢不灵（执行机构）之间的矛盾，体现了轧管技术自动控制的当代水平。

HCC系统是液压元件、机械部件和电子器件的组合件。它可实时测定液压缸两侧的压力值以及和轧辊箱或可移动工具相联的活塞杆的位置座标并输入HCC控制系统（见图4.3-57），这一系统和基础自动化层以及工艺过程控制系统



相接口，以实现轧管工艺的要求。液压小舱可以替代机械压下系统，而且具有位置调整和施加力能的双重作用，位置调整的精度可达±0.005 mm，反应时间为0.02~0.04 s。

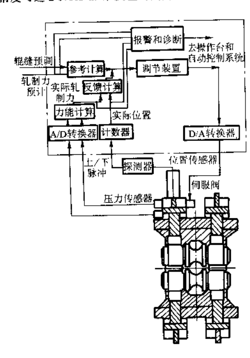


图 4.3-57 液压小舱控制系统原理示意图

2) HCC在MPM轧管机上的应用。在早期的MPM轧管机上采用机械压下装置，在轧制前调整轧辊，而在轧制过程中轧辊是不能调整的。后来机械压下装置和短行程液压小舱（行程为30~70 mm）一起使用，前者用于轧制前的轧辊预调，而具有短行程油缸的液压小舱可在轧制过程中作一定程度的轧辊调整。直至20世纪80年代末才改成由具有长行程液压缸（行程为70~200 mm）的液压小舱在轧制中调整轧辊，即所有机架都可作位置调节而对最后两架还可调节轧制力，这样的力能闭环系统可调节轧辊压下量，使钢管质量、尺寸精度得以保持最佳。此外，这种HCC系统还能对管件温度分布和机架弹性变形予以补偿。

3) 端部轧薄技术（FTS）在连轧管厂的应用。连轧管管端轧薄对于减少张减的切头损失是有效的。为使管端轧薄，管端处的轧制力要比管件中部的轧制力大2~3倍。采用理想的数模，可以用增大单架轧制力和对由此而引起的辊缝变化进行补偿的办法取得理想的端部壁厚减薄。实现FTS技术，必须采用液压压下系统或具有长行程液压缸的HCC。

① 日本住友金属海南钢管厂的液压压下系统。日本住友金属海南钢管厂曾两次采用液压压下的技术措施对7″和5½″连轧管机进行了改造。控制系统的原理图见图4.3-58。采用这一液压压下系统可以减少由于穿孔坯纵向壁厚不均、轧件纵向的温度分布不均以及工具磨损而造成的连轧管的壁厚不均。为使FTS技术取得最佳效果，必须：a）采用轧辊速度控制系统，以避免机架间出现推力。b）最后机架采用特殊孔型，以改善可能出现的壁厚不均。

为了确保压下系统开始工作的准确时间，要采用静态和动态适应两种制度，液压系统微机的一个功能就在于此，另一个功能是控制缸的位置。

为了加快液压缸的反应时间，并使液压伺服阀性能稳定，必须对喂进速度、液压缸错位以及液压反馈压力进行补偿，这就必须建立专用的数据处理系统和伺服控制系统。

图4.3-58即示出连轧管机过程计算机和液压压下系统微机对液压压下系统进行控制的情况，前者的主要功能是计算压下装置的整定值和轧辊速度，后者的主要功能是控制液压缸的位置和计算压下系统开始工作的时间。

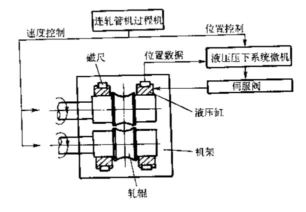


图 4.3-58 液压压下系统的原理图

② 采用具有长行程液压缸的HCC实现FTS工艺。HCC控制系统在全浮动芯棒连轧管工艺中的主要应用是实现FTS工艺。假如进入张减机的母体管其两端的壁厚比中间部分薄，则CEC控制的效果将明显提高，这种情况下CEC和FTS两大功能相结合，就会避免使用过分张力的危险，因此效果也就更佳，甚至在MPM轧机（主要是MINI—MPM）上，也通过在轧制中改变轧辊位置的办法以实现FTS工艺。为了避免机架间的过分张力或拖曳作用，电动机转速要作相应的变更。由于技术要求较高，这种功能只能通过具有长行程液压缸的HCC系统来实现。当然在这种情况下在第二级自动化层中要具有适当的数模以计算作为时间函数的液压小舱的位移量和马达速度的校正量。

据上所述，从减少整个机组的切损方面看，不具有HCC控制系统、不实现FTS技术的MPM轧机（指要通过张减机轧出成品管的MPM机组）反不如具有这两者的全浮动芯棒连轧管机组。

4.9 张力减径机组

(1) 设备特点

1) 张力减径机结构。张力减径机结构按轧辊的数目可分为二辊式、三辊式和四辊式三种。轧辊数增加使轧制时钢管受力和变形均匀，但会导致机架结构复杂，强度降低，给制造和维修造成困难。因此目前使用的为二辊式和三辊式。

三辊式张力减径机与二辊式相比具有以下优点而获得广泛采用：①增加变形的均匀性，有利于提高壁厚精度。②机架间距小，在理想直径相同情况下比二辊式减小12%~14%，从而可显著降低切头、尾的金属损耗。③所有机架传动轴可单侧水平安装（图4.3-59），从而简化减径机的传动，方便更换机架。④三辊式的轧机孔型可采用组装后在专用机床上加工，不需进行调整。三辊式张力减径机根据驱动轧辊的方式又可分为：①机架内齿轮传动（图4.3-59），单输入轴通过机架内两对锥齿轮带动三个轧辊。一般适用于进口管径为$\phi90\sim\phi150$ mm的机组。②机架外部齿轮传动、锥齿轮机架装在机架外部，并用三个传动轴分别驱动机架内三个轧辊。这一般用于进口管径为$\phi120\sim\phi250$ mm的张力减径机。

2) 主传动方式。张力减径机目前采用的主传动方式有单独传动、集中差动传动和液压差动传动等几种。目前国内发展的是集中传动、液压差动调速的张力减径机主传动系统，其传动原理图4.3-60所示。

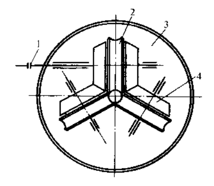


图 4.3-59 三辊式机架内齿轮传动机架结构示意

1—输入轴；2—轧辊；3—机架；4—锥齿轮

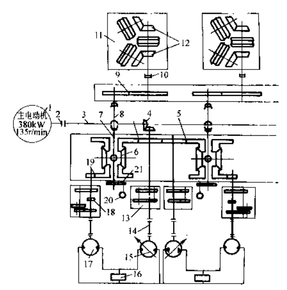


图 4.3-60 液压差动调速张力减径机传动系统原理图

1—主电动机；2—主联轴器；3—主传动轴；4—主传动锥齿轮；5、19—传动齿轮；6—差动齿轮；7—差动机构输出轴；8—万向接轴；9—减速齿轮；10—齿型接手；11—机架；12—机架内传动齿轮；13—增速机构；14—传动轴；15—变量油泵；16—单向安全阀；17—油马达；18—可变减速机构；20—测速发电机

各架轧辊转速由基本转速和叠加（辅助）转速通过差动机构叠加得到。基本转速通过主电动机 1 输出，经 2、3、4、5、6 的传动零件传递到差动机构输出轴 7，经减速齿轮 9 传到机架轧辊轴上，并使各架的基本转速递增。叠加转速由 1、2、3、4、13、14 等传动零件主电动机输出转速驱动变量泵 15，给油马达 17 供油，而使油马达获得需要的转速。再经可变减速机 18 通过传动齿轮 19 带动差动齿轮 6，使输出轴 7 获得一个可以变化的叠架转速。各架实际轧辊转速由测速发电机显示。

(2) 张力减径变形制度

1) 张力系数 Z　张力减径时应尽可能采用大的张力，以获得薄壁的或品管。但过大的张力系数会造成钢管在轧辊上打滑或咬不入，甚至使钢管产生拉断。因此张力系数只能小于 1（即 $Z_i<1$）。研究证实，在总减径率 $\varepsilon_{D\Sigma}$ 不大于 50～55%时，张力系数极限值 Z_{max} 主要受轧辊曳入能力限制；若 $\varepsilon_{D\Sigma}>55\%$以上，则 Z_{max} 值主要受钢管拉裂条件的限制。图 4.3-61 表示总减径率 $\varepsilon_{D\Sigma}$ 与张力系数极限值（Z_{max}）的关系。研究指出，中轧机架上的 Z_{max} 值随辊径的增大和减径率的减小而增大；始轧和终轧机架的 Z_{max} 值辊径和减径率的增加而增大。

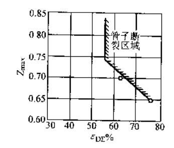


图 4.3-61 Z_{max} 与 $\varepsilon_{D\Sigma}$ 的关系

（开轧温度 950℃）

关于 Z_{max} 与钢管拉裂条件的关系，至今尚无统一的意见。多数研究认为，当 $\sigma_1=k$（即 $Z=1$）时，钢管产生拉裂。但实际表明，由于极限状态方程为：$\sigma_1-(-\sigma_D)=K$，故拉裂是发生在 $Z<1$ 的时候。由于钢管在变形区内的变形抗力大于机架间的变形抗力，所以拉裂是发生在机架之间。实际生产中 Z_{max} 在 0.65～0.85 之间，轧制温度高时取下限。

张力减径时，按机架间张力的变化分为始轧、中轧和终轧三部分。一般使张力升起到最大值的始轧机架数 m 为 2～3 架，而使张力下降至零的终轧机架数为 3～4 架。分配张力系数时应考虑：①为获得最大张力，必须使多数机架具有可能的最大值；②为避免钢管拉裂，Zi 值不得超过允许的最大值 Z_{max}；③不管实际 Z_i 值多大，它在中间的一架或几架中达到峰值。图 4.3-62 是张力减径中各架张力系数 Z_i 理想的分配方案。据此方案，大部分机架以最佳的 Z_i 值运行，只有少数入口和出口机架用来使张力升起和降落。

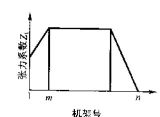


图 4.3-62 张力系数的分配

2) 减径率及其分配

① 单机架减径率和总减径率　张力减径时单机架的最大减径率极据钢管的品种来确定，它与壁厚系数、张力系数等有关，另外受钢管横断面稳定性的限制，单机架减径时最高减径率（即开始失稳时）称为临界值减径率，如图 4.3-63 所示。总减径率则根据管料和成品尺寸及其精度要求和机架数目来确定。张力减径时，由于有轴向张力存在，横向壁厚不均的程度大为减少，从而可大大增加单机架减径率。其总减径率最大可达 90%（28 架），单机架减径率可达 12%（最高可达 17%），但为了保证钢管质量，单机架减径率通常被限制在 7%～9%范围内。

② 减径率分配　减径率的分配就是把总减径率合理地分配到各机架上。一般地说，在机架数目既定的条件下，总减径率愈大，单机架的减径率也愈大。单机架的减径率的最大值多处于中间机架，而始轧和终轧机架均匀升、降，图 4.3-64 为典型的减径率分配图示。减径率分配原则为：a）中间机架 ε_{Di} 逐渐下降或均匀分配，前者可使各架孔型磨损均匀，轧制负荷均衡；b）开始张力升起机架的减径率相当于无张力减径机的减径率，但小于正常机架；c）终轧机架

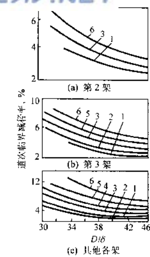


图4.3-63 三辊定、减径机的临界值减径率

1—$Z=0$；2—$Z=0.2$；3—$Z=0.4$；
4—$Z=0.5$；5—$Z=0.6$；6—$Z=0.7$

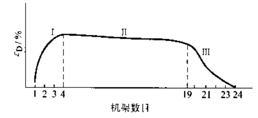


图4.3-64 张力减径时各机架减径率的分配

逐渐小，末架 $\varepsilon_{Dn}<1\%$，成品前架 $\varepsilon_{Dn-1}<3\%$，成品前架与正常机架的差值不大于3%；d）各单机架减径率与总减径率之间必须满足如下关系

$$(1-\varepsilon_{D\Sigma})=D_1/D_n=(1-\varepsilon_{D1})(1-\varepsilon_{D2})(1-\varepsilon_{D3})\cdots(1-\varepsilon_{Dn-1})(1-\varepsilon_{Dn}) \quad (4.3\text{-}111)$$

式中，D_1、D_n 为荒管和成品钢管直径，mm；ε_{D1}、$\varepsilon_{D2}\cdots\varepsilon_{Dn}$ 为各架的减径率，%。

3）减壁率及其分配

① 减壁率。张力减径时钢管减壁率是靠轴向张力得到的，而较大的单机架减径率是施加较大张力的条件，即要实现预期的减壁率，必须有相应的单机架减径率。实践证明，单机架减径率小于4%～5%时，不能发生减壁。同时，要获得一定的总减壁率 $\varepsilon_{t\Sigma}$ 也需要有相应的总减径率 $\varepsilon_{D\Sigma}$，实践还证明，当 $\varepsilon_{D\Sigma}<30\%$ 时，不能实现减壁。

单机架和总的壁厚变化率可按以下经验公式计算。单机架上两者关系为

$$\varepsilon_{ti}=(0.33\sim0.5)\ \varepsilon_{Di} \quad (4.3\text{-}112)$$

总的减壁率 $\varepsilon_{t\Sigma}$ 和总的减径率的关系为

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{t\Sigma}&=(\varepsilon_{D\Sigma}-13\%)\times0.55\ (\varepsilon_{D\Sigma}\geqslant50\%\text{时})\\ \varepsilon_{t\Sigma}&=(\varepsilon_{D\Sigma}-16\%)\times0.55\ (\varepsilon_{D\Sigma}<50\%\text{时})\end{aligned}\right\} \quad (4.3\text{-}113)$$

② 各架减壁率分配。分配减壁率总的原则是单机架的减壁率必须与单机架减径率相对应，再根据张力升起和降落是否平滑加以调整。例如，张力减径时沿机组顺序方向壁厚变化，如图4.3-65所示。虽然张力系数在始轧和中轧机架升起和降落保持平滑，中间机架的张力系数也接近一致，但 ε_{ti} 与 ε_{Di} 并非完全或正比关系，而是一种较复杂的关系。因此，先按单机架减径率相对应分配减壁率，然后在这基础进行减壁率调整。由图4.3-65可见，在始轧和终轧机架中，由于张力逐渐升起和降落，故壁厚增加，而在中轧机架上，壁厚按直线关系减薄。具体地说，若始轧机架为2～3架，则应按第1架增厚、第2架减薄（但仍大于原始壁厚）、第3架减薄（小于原始壁厚）；或第1、2架增厚，第3架减薄（仍大于原始壁厚），第4架减薄（小于原始壁厚）的原则进行分配，但要注意壁厚开始小于原始壁厚机架的减壁率应近似等于中轧机架的减壁率；始轧机架壁率；始轧机架壁厚增厚或减薄值一般在0.03～0.08 mm范围内。若终轧机架为3架，则取成品机架稍有增厚（或不变），成品前架总是增厚，成品再前架有增厚（或减薄）。终轧机架增厚或薄壁值一般在0.01～0.03 mm范围内，一般是倒数第3架或第4架的管壁最薄。

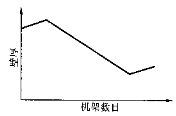


图4.3-65 张力减径时壁厚沿机组顺序方向的变化

中间机架的平均减壁率 $\bar{\varepsilon}_t$ 按下式计算

$$\bar{\varepsilon}_t=(1-\sqrt[n-1]{1-\varepsilon_{t\Sigma}})\times100\% \quad (4.3\text{-}114)$$

式中，$\varepsilon_{t\Sigma}$ 为总减壁率，%。

以上减壁率（或壁厚）的分配是作为第一次近似值，然后采用式（4.3-90）或式（4.3-91）逐架校核，可得较为精确的各架壁厚。

（3）各架转速 n_i 设定

轧辊转速计算是张力减径工艺的一个重要问题，轧辊转速计算是在4.9第（2）节中的减径率、减壁量和张力系数分配的基础上进行，其理论基础是各架金属秒流量相等，即 $F_1v_1=F_2v_2=\cdots=F_nv_n$，得到各架轧辊转速 n_{gi} 为

$$n_{gi}=\frac{(\bar{D}_1-S_1)}{(\bar{D}_i-S_i)}\frac{S_1D_{k1}n_{g1}}{S_iD_{ki}}=\frac{C}{(\bar{D}_i-S_i)\ S_iD_{ki}} \quad (4.3\text{-}115)$$

式中，D_{k1}、D_{ki} 为第一架和某架轧辊工作直径，mm；S_1、S_i 为第1架和某架钢管壁厚，mm；$\bar{D}_1$、$\bar{D}_i$ 为第1架和某架钢管平均直径，rpm；n_{g1}、n_{gi} 为第1架和某架轧辊转速，mm；C 为连轧常数。

由式（4.3-115）可见确定任一架轧辊转速 n_{gi}，并建立起一定的张力，主要确定 D_{ki} 和 S_i。

1）轧辊实际工作辊径 D_{ki}。轧辊实际工作辊径 D_{ki} 按下式计算

$$D_{ki}=D_{oi}-2a_iy \quad (4.3\text{-}116)$$

式中，D_{oi} 为某架轧辊理想直径，mm，$D_{oi}=D_{imin}+2a_i$；D_{imin} 为某架轧辊孔型槽底直径，mm；y 为系数，推荐值见表4.3-6；a_i 为某架孔型的长半轴。

表4.3-6 推荐值

机架号	1	2	3	4	5	中间机架	$n-4$	$n-3$	$n-2$	$n-1$	n
推荐值	0.5	0.6	0.7	0.8	0.86	0.86	0.86	0.9	0.96	1	1

2）各架钢管壁厚确定　由4.9第（2）节得到的各架的钢管壁厚只是个假设值，为了得到接近实际壁厚值可采用如下公式计算

$$
\left.
\begin{aligned}
&\Delta S_i = A\frac{\overline{S}_{i-1}}{\overline{D}_{i-1}}\Delta D_i\\
&A=\frac{2\left[1-\dfrac{3S_{i-1}}{\overline{D}_{i-1}}-2\overline{Z}\left(1-\dfrac{2S_{i-1}}{\overline{D}_{i-1}}\right)\right]}{(1-\overline{Z})\left[1+3\left(1-\dfrac{2S_{i-1}}{\overline{D}_{i-1}}\right)^2\right]+2\overline{Z}\left(1-\dfrac{S_{i-1}}{\overline{D}_{i-1}}\right)}\\
&S_i = S_{i-1}-\Delta S_i
\end{aligned}
\right\}
\qquad (4.3\text{-}117)
$$

式中，S_i、S_{i-1}为该架和前架钢管壁厚，mm；$\overline{D}_{i-1}$为前架钢管平均直径，mm；ΔD_i 为该架上的减径量，mm，$\Delta D_i=\overline{D}_{i-1}-\overline{D}_i$；$\overline{Z}_i$ 不平均张力系数，$\overline{Z}_i=\frac{1}{2}(Z_i+Z_{i-1})$，可用 4.9（2）张力系数分配得到值。

5 钢管斜轧延伸

早就有人研究用斜轧延伸机来代替纵轧延伸机（如自动轧管机），这是因为斜轧延神机可轧出精度较高的钢管，设备较为简单，用一台斜轧延伸机可以代替自动轧管机和均整机。最早是三辊斜轧机研究成功并投入生产，通称阿塞尔（Assel）轧机。用这种轧机可生产出尺寸精度很高的厚壁钢管，这是其他热轧无缝管机组无法生产的。这种轧机主要用来生产壁厚 10～50 mm 的轴承钢管和机械构造用管以及超高压管。这种轧机也有缺点，如产品范围较窄，不能生产薄壁管，多为生产 $D/S \leqslant 11\sim12$ 的厚壁管。难于生产薄壁钢管的原因是：由于变形区由三个轧辊所构成，这样孔型的密闭性较差，特别是轧制钢管头尾时很容易出现头部喇叭口和尾三角形。为了防止出现“尾三角”，在生产中不得不采取小的前进角，一般为 2°～4°，使得机组产量显著下降。

为了在三辊斜轧机上轧制薄壁钢管，法国发明了特朗斯瓦尔（Transval）轧机。这种轧机的特点是回转牌坊可以在轧制过程中回转；到轧制终了前减小牌坊回转角，一方面减小了前进角，降低了轧制速度，另一方面轧辊脊部内接圆变大，从而使管壁增厚，增加了管子的稳定性，不易出现尾三角形。

在发展三辊轧管机的同时，两辊斜轧延伸机也得到了发展。主要有狄塞尔轧机和带导扳的二辊斜轧延伸机。

狄塞尔轧机是用主动旋转的导盘来代替一般二辊斜轧机的导扳，目的是为了在延伸机上有较大的减壁量，从而可以轧制薄壁钢管。由于导盘圆周速度要大于轧辊圆周速度的轴向分量，这样，旋转导盘对钢管必然要产生一个轴向拉力，提高了纵向延伸变形，减小了金属和轧辊之间的滑移，因此可获得薄壁钢管。

20 世纪 80 年代斜轧延伸轧管技术的发展确是无缝钢管生产技术发展史上的大事。1982 年三辊行星轧管（PSW）在德国 ESW 厂投产，1987 年 CAM（Convergent Assel Mill）二辊轧管机在西班牙 Tubos Reunidos 厂投产，1990 年新狄塞尔轧管工艺（Accu Roll）翻新复活。

5.1 三辊斜轧管机轧管

三辊轧管机目前可以生产 $\phi240$ 以下的钢管（$D/S\leqslant 40$），管长达 8～10 m。这种轧管机的优点是：容易生产厚壁管，产品尺寸精度高（外径 ±0.5%、壁厚 ±5%～7.5%），钢管表面质量好，轧机调整方便，容易改变规格、轧管机工具消耗少，易实现自动化等。其缺点是生产率较低，需要采用优质管坯，生产薄壁管比较困难。这种方法目前主要用来生产轴承管和枪炮等高精度厚壁管。

（1）三辊轧管机及变形区组成

三辊斜轧管机结构有阿塞尔（Assel）和特朗斯瓦尔（Transval）两种。最早的阿塞尔轧管机，它是美国人 W.J. 阿塞尔 1932 年发明，1935 年用于工业生产。这种轧管机由三个主动轧辊和一个芯棒组成环形封闭孔型（图 4.3-66）。三个轧辊“对称”布置在以轧制线为形心的等边三角形的顶点，轧辊轴线成两个倾斜角度。以上辊为例，轧辊轴线与轧制线在包含轧制线的垂直平面上的投影线之间的夹角 φ（图 4.3-67）、称之为辗轧角；两者在水平面上投影线之间的夹角 α 称之为送进角（图 4.3-66）

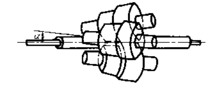
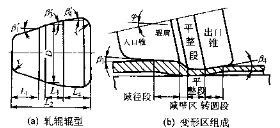


图 4.3-66 三辊轧管机工作原理图

轧辊辊身分入口锥、辊肩、平整段和出口锥四段（图 4.3-67a）。相应的轧管变形区分咬入（减径）区、减壁区、平整区和转圆区（图 4.3-67b）。由穿孔机送的毛遊，套在长心棒上，用喂管器送入轧管机轧制，毛管在变形区中经咬入、减壁（同时减径）、平整和转圆而成荒管。



(a) 轧辊辊型　(b) 变形区组成

图 4.3-67 三辊轧管机轧辊辊型和变形区

阿塞尔轧管机只能轧制 $D/S\leqslant12$、轧制外径小于 $\phi50$ mm 的钢管。当轧制更薄的荒管时，荒管尾部会出现“尾三角”，轧制过程无法终了。为了解决这一问题，出现了特朗斯瓦尔轧管机，这种轧管机是 1967 年法国专利，它是在阿塞尔轧管机基础上发展起来的。本质上还是阿塞尔轧管机，所不同的是可在轧制过程中实现变送进角、变轧制速度，即根据需要能在每根管子轧制过程中迅速改变送进角和轧辊转速。它与阿塞尔轧管机相比具有以下优点：①可轧制出薄壁荒管，采用变送进角轧制法（轧制毛管尾部时采用较小的送进角）可轧出 $D/S\leqslant40$ 的薄壁荒管。②可提机组产量。阿塞尔轧管机由于荒管会出现“尾三角”的限制，对不同 D/S 值的荒管均采用较小的送进角和轧辊转速，故生产率较低。而这种轧机可采用较高的轧辊转速和较大的送进角（只是在轧制尾部时采用较小的送进角）使生产率提高。③可以利用变送进角和改变孔喉尺寸的方法生产变截面管，如管端加厚管等。

特朗斯瓦尔轧管机是靠转动入口回转牌坊来改变送进角的（轧辊轴承应有球面轴承座）。改变送进角的同时，孔喉尺寸也发生变化。例如，减小送进角，则孔喉直径增大。有些实现变送进角的轧机，采用偏心鼓式变送进角机构和单独的改变孔喉尺寸的轧辊快速回退机构。

（2）三辊轧管的管端控制

在三辊斜轧机轧制薄的管子时，由于轧入和轧出阶段空心坯形状的稳定性较差，在生产 $D/S\geqslant12$ 的管子时必须采取特殊措施避免在三辊轧管机的机架内和或下游机组内产生管段的破损。

在三辊轧管机发展的历史过程中，为了扩大这一工艺的使用范围，特别是为了生产薄壁的管子，对这一问题采取了许多种解决办法，有如下三个主要发展阶段：

第一阶段是 20 世纪 60 年代的特朗斯瓦尔轧管（Trans-



val）工艺，它是法国 Vallourec 公司的专利，Transval 轧管机的一个牌坊是固定的，另一个牌坊可绕轧制线旋转，以调整角度，其最大旋转角可达 23°。回转牌坊的旋转借助于液压缸，轧机可按以下三种方式工作：

1）简单的倾斜，此时轧机和普通的斜轧机一样。

2）“两倾角”工艺，此时轧机可具有“轧制倾角”及终轧时的“减小倾角”。

3）“三倾角”工艺，除了轧制尾端时减少倾角外，轧制开始时也改变倾角。

Transval 工艺可将轧管的范围扩大至 $D/S\leqslant16$，但需采用专门设计的机架。当管件将轧出时，减小喂入角，以扩大孔型。然而采用这一工艺将会增大切头损失。

第二阶段是 20 世纪 80 年代的“Quick Lifting”系统，即“快速液压抬辊法”，Quick Lifting 系统亦称做 Quick Open 系统，即在管子后端快离开轧辊之前提升轧辊，不轧制管子的后端，防止尾端出现“三角形”，快速抬辊共有两种办法：一是平抬法；二是先旋转一个角度，然后再倾斜上抬。再者，从使轧辊打开所使用的能源的角度，可分为电气快速调整轧辊法和液压快速调整轧辊法，而以后者为佳。该法可生产 $D/S\leqslant35$ 的管子，通过轧辊径向快速打开的方法使管壁减薄的程度削弱，从而得以避免管端形成“喇叭口”。采用这种轧辊快速调正系统，管端切损长度可减少到 50 mm 左右。

第三阶段是 20 世纪 80 年代末发展起来的 NEL（No End Loss）系统，如图 4.3-68 所示。采用这种工艺，由于增厚而产生的切头损失几乎降为零，这是因为空心坯后端的减径和减壁分别是在不同的变形过程中发生的，因此，只产生微量的直径增大。采用这一系统可以生产 $D/S\leqslant40$ 的管子。

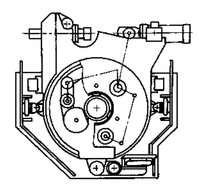


图 4.3-68　NEL 系统示意

（3）三辊轧管机芯棒操作方式

三辊轧管机的芯棒操作方式有全浮动（随动）、半浮动（限动）和回退式三种

1）全浮动芯棒的操作方式。全浮动芯棒的操作方式是芯棒插入毛管后一起送入轧机中，轧管过程中自由随同管子运动，并与管子一起通过轧机。轧后用专门的脱棒机脱棒，下一根毛管用另外的芯棒轧制。轧后芯棒进入冷却、润滑循环系统。此方式的优点是轧制效率高，荒管质量好，操作速度快、轧管辅助时间少，生产率高，处理事故方便，轧机前后简单，出现尾三角缺陷时的 D/S 值较大（达 12），有利于轧薄壁荒管。其缺点是芯棒长度长，备用量多并需要专门的脱棒机构。

2）半浮动芯棒的操作方式。半浮动芯棒（限动芯棒）的操作方式是将芯棒装在小车上，轧制时芯棒可自由旋转（有的用电动机驱动与管子同向旋转），并连同小车一起随管子向前运动，但其前进速度比管子小，而且是有专门的机构控制。轧制结束后，将芯棒直接从荒管中抽出并返回原始位置。继续下一根毛管的轧制。这种操作方式的优点是芯棒长度较短（为全浮动式的 1/2 左右），只需一根芯棒工作，节约了芯棒储备，不需设专门的脱棒机。其缺点是生产率比全浮动式的低，出现尾三角缺陷时的 D/S 小（约为 10），处理轧制故障不方便。

3）回退式芯棒的操作方式。回退式芯棒的操作方式是将芯棒装在小车上，芯棒运动受小车的限制。芯棒穿过毛管并到达最前部极限时开始轧管，开动芯棒小车使芯棒按给定速度后退，芯棒逐渐地从轧完部分荒管中抽出，轧制结束时芯棒抽出工作也全部完成。这种方式的优缺点同半浮动式大体相同，但生产率更低，出现尾三角的 D/S 值大约为 8。

根据上述，目前大多数三辊轧管机均采用全浮动式。个别生产厚壁管或小批量生产的机组，则采用半浮动退式操作，用回退式操作可以生产 D/S 值小至 2.5 的特厚壁管。

（4）三辊轧管机运动学特点

在三辊轧管机上由于三个轧辊驱动，而且心棒为全浮动式并且无导板阻力。因此轴向滑动系数比一般斜轧机高，一般为 0.60～1.18 范围内。影响三辊轧管时轴向滑动的因素有：①在人口锥中有一定的减壁量可提高 η_x，但当超过总减壁量 15% 时就不再起作用。②随辊肩高度 h 的增加 η_x 减小，这是由于辊肩轴向阴力增加所致。③ η_x 随送进角的增加而增加。④ η_x 随轧辊圆周速度增加而稍减小。⑤全浮动式 η_x 最大，半浮动和回退式 η_x 值较小；⑥心棒润滑对全浮动式影响较小，而对半浮动和回退式影响明显。

5.2　狄塞尔轧管机轧管

狄塞尔轧管机如图 4.3-69 所示，Sam Diescher 对斜轧延伸工艺进行了构思并获得了专利，这一轧管原理是崭新的、独特的。要讲述狄塞尔轧管机还得从 20 世纪 20 年代初讲起。

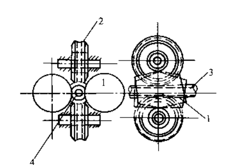


图 4.3-69　狄塞尔轧管机示意图

1—轧辊；2—导盘；3—钢管；4—芯棒

B &W 公司在 1907 年购入 Pittsburgh Seamless，到 1922 年止他们继续以 Pittsburgh Seamless Tube Co. 的名义经营管理。按照 1922 年 12 月 29 日的营业执照，公司改名为 B &W Tube Co.。在 20 世纪 20 年代，B &W Tube Co. 对一系列的计划进行了研究，其目的在于改进斜轧穿孔工艺，建造了 1 台能以各种方式穿孔 $\phi51$ mm 圆坯的小型穿孔机，经过约 5 年的时间，运行才有良好的发展势头。20 世纪 20 年代后期 B &W Tube Co. 支持 Sam Diescher，使他得以证明他的采用高速回转导盘的斜轧延伸理论的正确性，达台狄塞尔（Diescher）轧管机在 1932 年安装完毕。

在周期轧管工艺和自动轧管工艺发展了近 30～40 年之后，才出现了斜轧延伸工艺即狄塞尔轧管工艺，Sam Diescher 将斜轧穿孔机的基本结构移用于延伸轧管。

斜轧延伸工艺和纵轧延伸工艺相比较，其优点是轧出的管子壁厚偏差较小。其缺点是轧制速度较低，因而生产率较低。而且由于辊缝处交替产生的弯曲应力，使管子的内外表



面有产生裂纹的危险。

早期的狄塞尔轧管机的工艺过程如下：轧管所用的管坯在狄塞尔穿孔机上穿轧成空心坯，在热状态下被送至附近的狄塞尔轧管机上。按构造及工作原理来说，狄塞尔轧管机和穿孔机是一样的，两者的区别仅是：在穿孔机上，管坯处于轧辊之间由顶杆所支持于轧线的顶头上进行穿轧，而在轧管机上热的空心坯连同穿在其中的长芯棒被送入轧辊间，在芯棒上将空心坯轧成钢管。

长芯棒是用芯棒推入装置穿入空心坯的，轧辊调整是靠手轮手动操作。导盘安装在摆动支架上，摆动支架可根据所要求的钢管直径将导盘调整到所需要的位置。在轧管机上轧制之后，带着芯棒的钢管由辊道送至芯棒抽出装置的斜槽，芯棒抽出装置由两个摩擦辊组成，芯棒被辊子咬住，并自由地由钢管中抽出，然后返回到轧管机以备轧制下一根钢管。

5.3 Accu－Roll 轧管机轧管

Accu－Roll 轧管机是综合了目前热轧无缝钢管生产机组（狄塞尔轧管机、三辊轧管机、连轧管机等）的成熟经验和有效工艺，而发展起来的最新轧管设备，它是一种带主动导盘的二辊卧式斜轧机（图 4.3-70）。其轧机结构上有以下特点：

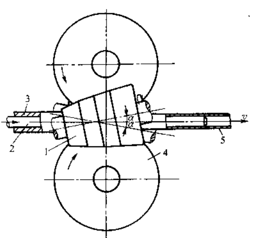


图 4.3-70　Accu－Roll 轧管机示意图
1—轧辊；2—圆杆芯棒；3—毛管；
4—主动导盘；5—荒管

1）Accu－Roll 轧辊机具有两个锥形轧辊。轧辊轴线相对于轧制线倾斜一个送进角 α 外，还倾斜一个辗轧角 φ。这样的轧辊配置使轧辊直径顺轧制方向逐渐加大，有利于减少滑动，促进金属纵向延伸和减轻附加扭转变形。

2）采用两个大直径的主动导盘。导盘的圆周线速度大于荒管的出口速度，以提高轴向滑动系数。大导盘对变形区的管壁起支撑作用，同时寿命长，从而可保持荒管尺寸稳定、减少荒管表面划伤和压痕，并扩大轧制荒管的 D/S 值到 4～40。这与三辊轧管机或其它斜轧机相比，Accu－Roll 的灵活多用性增加。主动导盘的结构上可垂直调整，以改变孔型直径；可沿轧制线调整，以更好地支持毛管；还可轴向调整，以得到最大程度的导向。

3）采用限动芯棒操作方式。其芯棒工作部分长度 2.44～3.05 m，可轧出 18.3 m 的荒管。轧制过程中，不论轧出荒管长短，芯棒整个部分都在工作，故磨损均匀，提高使用寿命。由于芯棒受有的压力小，故可使用较便宜的材质，也不需要进行镀铬。Accu－Roll 轧管机的插棒操作可在线进行，也可增高线外插棒装置。

4）Accu－Roll 轧管机采用无辊肩的轧辊辊型，如图 4.3-71 所示。这就克服了三辊轧管机因轧辊辊肩部分的减壁量集中，而降低了轧辊寿命和均整壁厚效果。Accu－Roll 轧管机轧管时的变形区组成如图 4.3-71 所示。减径区的实际入口锥角为 4.5°，用来引导毛管进入变形区和减径区；减壁区的实际工作锥角为 2°；辗轧区的轧辊母线与芯棒平行，其应有足够的长度，以便充分搭接，均整管壁和减小荒管上的螺旋道壁厚不均。转圆区的实际出口锥角为 2°，使荒管圆整和便于脱棒。这样设计的轧辊辊型，可以充分实现斜轧轧管机的均壁作用，从而提高荒管的壁厚精度。在 Accu－Roll 轧管机上壁厚不均能达到 API 标准规定的一半。例如，对于壁厚为 12.7 mm 的产品，其壁厚公差将为 ±3%，甚至更小些。

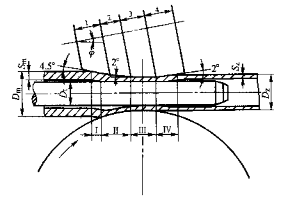


图 4.3-71　Accu－Roll 轧管机轧辊辊型和变形区组成
Ⅰ—减径区；Ⅱ—减壁区；Ⅲ—辗轧区；Ⅳ—转圆区
1—入口锥；2—工作锥；3—均整段；4—出口锥

5）Accu－Roll 轧管机后台设置长达 18.3 m 的辊式定心装置，对荒管保持良好的导向，这有助于改善荒管的壁厚不均。

Accu－Roll 轧管机的优点包括：①Accu－Roll 轧管机组工序少（管坯加热炉、穿孔机、Accu－Roll 轧管机及一台定径机），对于直径 ϕ114 mm 以上规格可以不要再加热炉，如果布置紧凑的话，规格再小一些也可以不用加热炉。②Accu－Roll 轧管机组产品范围宽，一套机组仅用三种管坯生产直径 114～270 mm 的钢管，年产量为 18～36 万 t。并可在这机组上生产所有 API 钢级的石油管、锅炉管、轴承管、机械用管和结构管。③所需设备少，投资费用低，建设周期短，而生产能力大。④Accu－Roll 轧管机轧管消耗少、成本低。使用芯棒长度短，工具消耗小。⑤Accu－Roll 轧管机的电耗仅为连轧管机的一半左右；金属收得率高；操作人员少。

综上所述，Accu－Roll 轧管机是一种具有发展前途的新型轧管设备，对于现有轧管机组改造及改善产品质量、扩大产品规格范围或提高产量来说，按照具体情况不同用它来替代自动轧管机、顶管机、皮尔格轧管和三辊轧管机是一种可取的方案。

5.4 三辊行星轧机（PSW）轧管

（1）PSW 的工作方式

三辊行星轧机的三个锥形轧辊相互间成 120°排列，并绕轧件旋转，使轧件的断面积得到压缩。这样，由三个轧辊的表面构成一个锥形的成形区。由于轧辊是倾斜的，旋转运动使轧件咬入，并通过成形区，轧辊由主电动机通过一套行星齿轮系统驱动（图 4.3-72）。



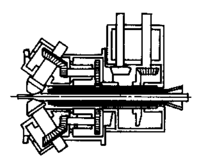


图 4.3-72 三辊行星轧机的剖面图

辊轴可绕着行星齿轮的轴线安装，这样可根据不同咬入情况调整轧辊的倾斜度。当变换轧制坯料时，用另一台电动机来防止轧件在轧辊调整或变形条件不同的情况下所产生的微小转动。只需调整三个锥形辊的中心距，就可以任意选择轧件的出口尺寸，而不用修改孔型。只有在轧辊磨损后或轧制规格有较大的变动时，才需要更换轧辊。

与其他斜轧机相比，除了在运动方式上不同，即轧辊绕着轧件旋转外，这项技术的想法也是很独特的，轧件与轧辊的轴线可以成很大的角度（图 4.3-73），这会产生如下效果：

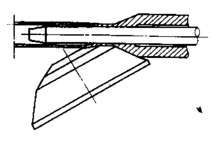


图 4.3-73 三辊行星轧机轧管时的变形区

1）材料在变形过程中不发生扭转。这对于断面减缩率大，以及轧制薄壁管时是很必要的。

2）可以实现大送进角。传统斜轧机的送进角为 6°～12°，而 PSW 为 30°～40°，因而大大提高斜轧工艺的变形效率，可以得到和纵轧同样的效果。

PSW 管材生产新工艺的主要特点是连轧（图 4.3-74），即将延伸工序（PSW）和精轧工序（定径或张力减径）结合起来，形成一套连续的操作系统。但到目前为止，在无缝管生产中还没有达到这一点。也有的称为“连轧管机组”，但实际上仅在几个机架间进行连轧，而且还需要另外的装出料及再加热设备。

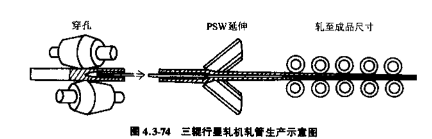


图 4.3-74 三辊行星轧机轧管生产示意图

PSW 轧管生产工艺汇集了传统延伸方式的优点，其生产工艺如下：将空心管坯送到 PSW 的入口处，插上芯棒，然后送入 PSW 或形区，将芯棒位置固定后，空心荒管轧成，可达到很高的延伸系数。

在 PSW 的出口，轧后的荒管自动脱离芯棒，并可直接进入定径机或张力减径机，轧成一定外径和壁厚的成品管。由于 PSW 不采用浮动芯棒，并且延伸系数很高，因此它所用坯料的重量比传统轧机大 3～4 倍。坯料质量的增加也就意味着轧管机组的成材率提高。

（2）PSW 生产效果和经验

原联邦德国马克西米利安冶金股份公司将其埃施魏勒（ESW）工厂的设备进行了大规模的更新。将两台周期轧管机换掉，用 PSW 来完成整个管子生产。他们所以这样做，是由于 PSW 的效果：

1）管子的壁厚尺寸范围比所有的传统工艺都广。图 4.3-75 表示 PSW 与周期轧机规格范围的比较，以及 ESW 工厂的 PSW 所生产管子的规格。

2）PSW 可保证管子的尺寸偏差比 API、DIN 及其他标准中规定的范围都小。

PSW 的一个重要的优点就是坯料质量很大。如可将 8 m 长的空心管坯轧成 50 m 长的荒管，这种偏况下（如油井管），成材率可达 90%～92%。

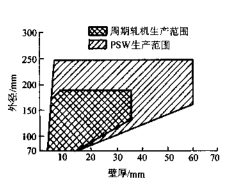


图 4.3-75 钢管生产规格范围图

管子的生产长度是评价轧管机组的重要标志。PSW 不仅使产品规格变换灵活，而且可生产长管，到目前为止，用其他方法还不可能达到这样的长度。目前生产管子的最大长度主要取决于延伸机，一般在 15～40 m。而采用 PSW 时，管子长度仅取决于穿孔工序。使用 PSW，管子的延伸系数可达到 12，而且管长不受工具（芯棒）的限制。例如，可将 10 m 长的空心管坯轧成 120 m 长的荒管。

图 4.3-76 为生产 ϕ426 mm 管子的 PSW 的平面图。很显然，即使在管长达 120 m 时，其轧机结构仍很简单、紧凑。这种规格的轧管机组的生产能力为 7.5 万 t/a。

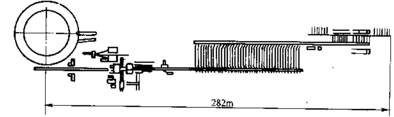


图 4.3-76　可生产 φ426 管子的 PSW 的平面图

6　钢管的周期轧制

周期式轧管机（Pilger Mill）为二辊不可逆式轧机，“Pilger”由“Pilgrim”一词演变面来，源自轧机的动作与朝圣者两步向前、一步朝后的步伐的相似性。周期式（皮尔格）轧管机是 1890 年发明，1891 年实践成功，是最早发明的无缝钢管轧机，其轧辊好像一对对称布置的凸轮，因此这种轧机又像是带周期断面孔型的辊式轧管机。这种轧机的轧辊的轧槽形状呈不规则的锥孔状，除了完成最终轧制那部分的孔型以外，与辊颈呈偏心。与通常的轧制技术相反，轧辊是与钢管前进方向逆向旋转的，在轧辊旋转的一周过程中。约有 1/2 时间是轧辊咬住荒管并将其轧成钢管，此时，钢管被轧辊推向后退。在其余 1/2 旋转过程中，轧辊松开钢管，轧辊间的开口允许荒管前进，在此瞬间，荒管由喂料器送进一个喂人量，同时旋转 90°，钢管就是这样在交替的往复运动和回转运动中轧成的。因此，可以说周期轧管机的发展史主要是喂料装置的发展史。

要从技术上了解周期轧管工艺，有两点至关重要：①轧辊孔型；②喂料器。

轧辊孔型的轧槽分锻轧带、精轧带、轧出带和空轧带。各部分功能如下：①锻轧带，主要的压下量发生在这一带，管子的壁厚在此段被辗轧成等于成品管壁厚。②精轧带，即等直径段，管子在此段至少重轧两道。③轧出带，在此带孔型渐开，轧制压力递减，以释放工件。④空轧带，将工件释放，此时工件将转过 90°。锻轧、精轧和轧出三带合称工作带，锻轧带约占 70°～100°，精轧带约占 57°～90°，轧出带仅占 22°～38°。

周期式轧辊横断面上有两个主要区域——空轧区和工作区，分别用中心角 θ_x 和 θ_P 表示（图 4.3-77）。空轧区相当于轧辊的”开口”，当其张开时，可以将毛管翻转并送入轧辊中。

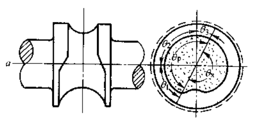


图 4.3-77　Pilger 轧机周期式轧辊

孔型的工作部分又分为 3 个区域，它们相当于中心角 θ_1、θ_2 和 θ_3。称为锤头或前锥的区域 θ_1，孔型半径逐渐减小，用以压缩毛管，使毛管完成主要变形；称为定径带或研磨锥的区域 θ_2，孔型由同一半径组成，用以轧平管壁和精整，使钢管获得最终的直径和壁厚尺寸；称为出口锥的区域 θ_3，用来使轧辊表面逐渐而平稳地离开钢管。

周期轧管工艺过程的运动按图图 4.3-78 中的 6 个位置作如下解释：图 a 喂料器将空心坯和芯棒移向装于周期轧管机机架中的轧辊；图 b 空心坯被轧辊抓住；图 c 空心坯在锻轧带辗薄延伸，轧件向后运动；图 d 空心坯在精轧带精轧，轧件向后运动，图 e 空心坯处于轧出带；图 f 空心坯被轧辊释放，从而转过 90°，再度喂人。轧辊每转一转，上述过程重复一遍，在此过程中空心坯分段地向前喂人，逐段轧成管子，最后不能再轧的一小段被称为皮尔格头，轧制终了被锯去。

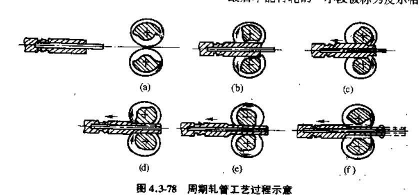


图 4.3-78　周期轧管工艺过程示意

轧制过程按周期式轧制原则进行，轧辊每转一圈，毛管某一段被辗轧，这一段长度称为送进量 m（图 4.3-79），其大小取决于设备性能、钢管尺寸及钢种、轧辊直径和孔型设计等因素，实践证明其值不大于 30 mm。有的技术文献称周期轧管工艺为“非连续式分段纵轧”。由以上工艺特征决定了这一工艺的致命缺点：生产率太低。

周期轧制是锻造（在每个周期节距之始）和纵轧相结合的过程。周期轧制时，除轧辊孔型的周期性外，其不同于一般纵轧之处还在于：轧辊旋转方向与毛管送进方向相反，而

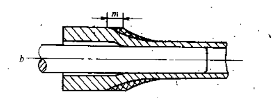


图 4.3-79　周期式轧制送进量和道次压缩量

毛管压缩乃由直径变化的轧辊实现。由于圆孔型带有 25°～30°的侧壁斜角，所以金属的变形在孔型的圆周上是不均匀

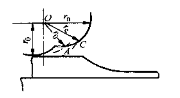


的。当送进量很大时对低塑性金属而言就可能引起横向拉裂。

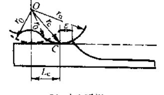
6.1 周期式轧管变形过程和变形量

金属变形过程如图 4.3-80 所示。轧制前毛管进入受料槽，然后往毛管内插入芯棒，用特殊喂料机将毛管喂入轧辊。

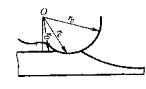
开始压缩前（图 4.3-80a)），相应于弧 AC 的轧辊表面几乎平行于毛管的母线。当回转到某一角度时，轧辊和毛管在 C 点接触，C 点被称为咬入半径 r_c（图 4.3-80b)）。在最小半径 r_0 和最大半径 r_n 之间的所有各点，和毛管的接触都较 C 点为晚。在半径 r_0 进到轧辊中点线之前，轧辊的表面压缩毛管壁（图 4.3-80a)），并且变形过程相似于旋转摆动锤中的变形过程。当轧辊继续旋转而使半径 r_0 进到轧辊中点线时（图 4.3-80d)），毛管在轧辊半径逐渐增大的锤头区受到压缩，在这一阶段，以可变的压下量轧制毛管，变形过程和纵轧相类似。



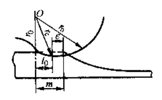
(a) 轧制开始瞬间



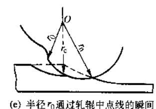
(b) 咬入瞬间



(c) 咬入时期内压缩毛管



(d) 半径 r_0 进到轧辊中点线的瞬间



(e) 半径 r_0 通过轧辊中点线的瞬间

图 4.3-80 周期轧制的连续阶段

当半径 r_c 进到轧辊中点线时，虽仍以可变的变形量压缩断面，但却在轧辊半径不变的情况下辗轧毛管。

当孔型空轧部分张开后，将毛管向轧辊中推入一送进量 m，重新实现咬入，重复轧制周期。在周期轧制过程中，计算某一截面压下量的原则为：变形区中任一截面 $A—A$，在一个往复轧制过程中的压下量等于 $A—A$ 截面的高度和离开这个截面为 l_x 距离的 $B—B$ 截面的高度差，$A—A$ 与 $B—B$ 之间的金属体积应等于金属送轧体积，如图 4.3-81 所示。

根据这个原则，实际生产中可用近似的方法决定周期头任一断面 $A—A$ 的压下量。用梯形 $AABE$ 代替周期头区段 $AABB$，梯形面积等于

$$0.5\ (S_x + S_x')\ l_x = S_0 m \qquad (4.3\text{-}118)$$

式中，S_0 为毛管壁厚。

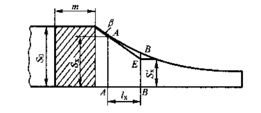


图 4.3-81 近似决定周期轧制时的压下量

梯形侧边 AE 的倾斜角，取其等于 A 点处周期头曲线的切线倾斜角 β，当这一曲线为已知时，就能很容易地求得此倾斜角。

用直线代替曲线区段，就会使压下量比实际的稍有所增大。

当角 β 已知时，梯形高

$$l_x = \frac{S_x - S_x'}{\tan\beta} \qquad (4.3\text{-}119)$$

因此

$$S_0 m = 0.5\frac{(S_x + S_x')\ (S_x - S_x')}{\tan\beta} = \frac{S_x^2 - S_x'^2}{2\tan\beta} \qquad (4.3\text{-}120)$$

$$S_x' = \sqrt{S_x^2 - 2S_0 m\tan\beta} \qquad (4.3\text{-}121)$$

压下量

$$\Delta S = S_x - S_x' = S_x - \sqrt{S_x^2 - 2S_0 m\tan\beta} \qquad (4.3\text{-}122)$$

6.2 周期式轧管咬入

纵轧时的咬入条件决定最大压下量，因而也就决定了轧机生产率。

锤头的轮廓分为钝的和尖锐的二种，如图 4.3-82 所示。

钝锤头轮廓的曲率半径大于尖锐锤头的曲率半径。一般说来，尖锐锤头会使毛管的“引轧”变难。但能使能量消耗降低，钢管质量改善和使轧辊寿命提高。

重车钝锤头时，随着辊径的减小，它又变成尖锐的了，当采用大直径轧辊时，尖锐的锤头能变成钝的。因面，在其他条件相同时，咬入条件就能决定是否能采用尖锐的锤头并能确定出重车时辊径变化的合理范围。

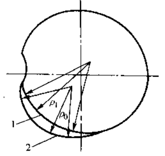


图 4.3-82 锤头轮廓

1—钝的；2—尖锐的

由于轧辊脊部轮廓的周期性，脊部和毛管接触的第一点就不是锤头工作部分的开始半径 r_0。咬入半径 r_c 是开始半径 r_0 和终了半径 r_n 之间的一个中间值。

周期轧制时的咬入分三种：强迫、自然和引轧咬入（图 4.3-83）。

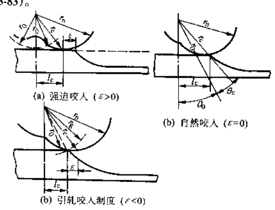


图 4.3-83 周期轧制时的各种咬入情况

强迫咬入的特征在于咬入半径 r_c 落到距周期头起点一定距离 $\varepsilon > 0$ 的地方。这种咬入形式在实际中很少见，只有当送轧量过大时才会看到。

自然咬入是稳定的周期轧制过程的特征，它和强迫咬入的区别在于咬入瞬间咬入半径和周期头起点重合，亦即 $\varepsilon = 0$。

毛管在开始轧制时送进量很小，常采用引轧咬入制度。在引轧咬入制度下，咬入半径落在毛管母线的延长线上，并距周期头起点的距离为 $\varepsilon < 0$。在这种情况下，实现毛管咬入的不是半径 r_c，而是较小的接触半径 r_g。

6.3 周期式轧管送进量的确定

周期轧机热轧钢管时送进量和延伸率影响着轧机生产率和产品质量。以最大送进量轧制薄壁管（$D/S \geq 25 \sim 30$）时，孔型中金属变形的不均匀性及钢管轴向力的存在既导致变形钢管沿横向和纵向丧失稳定性，同时又形成轧折、耳子等。轧厚壁管（$D/S < 25$）时，送进量一般受孔型过充满和锻轧段周期头椭圆度的限制，尤其是轧厚壁管时采用轧薄壁管的轧辊就更是如此。

通常，在总延伸率 μ_c 已知的情况下，送进量可这样计算：

$$m = \phi_c L_p / (\mu_c - 1) \qquad (4.3\text{-}123)$$

式中，ϕ_c 为轧辊工作段长度上相对变形的平均值，取决于所轧钢管的尺寸以及对钢管质量提出的要求和轧制条件，对于薄壁管，局部变形的平均值 ϕ_c 在 0.16～0.21 范围内，轧厚壁管时，ϕ_c 值随总延伸率的减小而减小；L_p 为工作段（锻轧段和精轧段）的长度：

$$L_p = (0.96 \sim 1.03)(\rho_N - 0.39D)\ \theta_p \qquad (4.3\text{-}124)$$

式中，ρ_N 为轧辊名义半径；D 为所轧钢管直径；θ_p 为工作段的角度。

轧厚壁管取小的 L_p 值，轧薄壁管取大值。

6.4 周期式轧管滑移现象

和普通纵轧相同，在周期式轧机上轧管时，金属也存在滑移现象。孔型顶部附近金属的水平运动速度大于轧辊水平速度（为前滑区），而在开口附近则小于轧辊圆周速度的水平分速度（为后滑区）。

因此，必然有这样一个截面，在此截面上轧辊圆周的水平分速度和金属质点的运动速度相同，这个面称为临界截面。与此相应的轧辊半径 R_K 称为轧制半径。

由图 4.3-84 有

$$R_K = R_i - r_K \cos\beta \qquad (4.3\text{-}125)$$

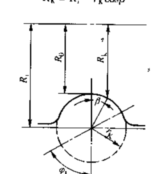


图 4.3-84 确定周期轧辊的轧制半径

根据前滑区和后滑区摩擦力应该相等的理论得出

$$\beta = \frac{\varphi_0 R_i - r_K \sin\varphi_0 + 0.32 r_K}{2R_i - 1.38 r_K} \qquad (4.3\text{-}126)$$

式中，φ_0 为对应于四分之一孔型的金属和轧辊的接触弧的角度。

孔型顶部的前滑系数

$$\omega_0 = \frac{R_K}{R_0} = 1 + \frac{r_K}{R_i - r_K}(1 - \cos\beta) \qquad (4.3\text{-}127)$$

在变形区长度上，每一截面 r_K 和 φ_0 是不同的，因而在轧制过程中，轧制直径和前滑亦在变化。周期轧制中某一瞬时的前后滑区分布如图 4.3-85 所示。极限截面 ab 由 β_0 决定。

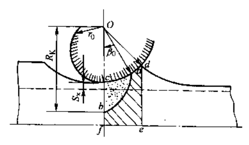


图 4.3-85 周期轧制时的前后滑区

β_0 由如下公式计算

$$\beta_0 = \arccos\frac{(S_x + R_0) + \sqrt{(S_x + R_0)^2 - 4R_K S_x}}{2R_0} \qquad (4.3\text{-}128)$$

式中，S_x 为在该瞬时孔型出口处的管壁厚；R_0 为轧辊脊部半径；R_K 为该瞬时的轧制半径。

由此可知，随着壁厚和轧制半径的增加，β_0 也增加。

即前滑区在周期头始端轧制时为最大，而向末端时逐渐减小。

根据实验得出不同因素对前滑值的影响如下：

1）送进量、毛管壁厚、毛管翻转角度变化在 10°范围内时都对前滑无影响。

2）随着温度升高，前滑值减小。

3）管子直径和前滑成正比增加。

4）前滑与锤头曲率半径、轧辊名义直径和孔型开口角度成反比。

6.5　周期式轧管轧制力的计算

由于孔型轮廓的周期性和周期头轮廓很复杂，接触表面的宽度和长度是变化的，且和轧辊与受压缩毛管的相互位置有关，因此，决定周期轧制时的接触面积，是一个非常复杂的数学问题。

对于技术上的计算，可近似的以菱形的面积代替接触表面的投影大小，此菱形的二对角线分别等于二倍的送进量 $2m$ 和毛管的直径 D_0。此时，就可用下而的简单公式表示接触表面的水平投影的大小：

$$F = \frac{2mD_0}{2} = mD_0 \qquad (4.3\text{-}129)$$

为了决定周期轧制时的单位压力，建议使用有名的被 П.Т. 叶美利扬连柯用实验修正了的卡尔曼－维诺格拉道夫公式：

$$p = \frac{\sigma}{30}\left[15 - \sqrt{0.283\ (t - 600)}\right]\ (4.1 - 0.3S) \qquad (4.3\text{-}130)$$

式中，σ 为所轧钢种在冷状态下的强度极限；S 为钢管壁厚；t 为轧制温度。

周期轧制时金属施加于轧辊上的总压力值，由于送进量的不均匀和过程结束前温度下降很大，故波动在一个很大的范围内。

送进量在很大程度上影响到压力的大小。当伴随有冲击的送进量过大时，可能使轧辊折断。因此，在作轧辊孔型设计和设计喂料器时，必须考虑周期节距范围内压力的分布特点。

压下过程中的接触表面长度在咬入时有最小值，随后有最大值，再随后又重新减小。最大值的位置为锤头轮廓曲率所决定，锤头曲率半径愈小，锤头愈尖锐，则最大值就愈接近于周期头的起点。因此，尖锐锤头下的最大压力发生在周期节距的起点，而在钝锤头的情况下最大压力的分布就接近于研磨区。

用周期式轧管机生产无缝管的主要优点是用钢锭直接轧成钢管，不需要建立管坯车间，减少了建厂投资，省去了由锭到坯的许多中间工序，使钢管成本降低。同时，可生产大直径钢管和异形钢管，且长度较大。但是，这种生产方式产品品种少，不宜生产合金管，钢管质量较差，生产率低。总之，周期轧管机具有巨大的优点，也有较明显的缺点，当生产一般质量的大型钢管或在无开坯能力生产管坯的地区，采用这种制管方式还是可行的。

编写：杨海波（北京科技大学）



参考文献

1 （美）V.B. 金兹伯格著．高精度板带材轧制理论与实践．姜明东、王国栋等译．北京：冶金工业出版社，2000
2 （美）V.B. 金兹伯格著．板带轧制工艺学．马东清等译．北京：冶金工业出版社，1998
3 日本钢铁协会编．带轧制理论与实践．王国栋等译．北京：中国铁道出版社，1990
4 邹家祥主编．冶金机械设计理论．北京：冶金工业出版社，1998
5 王廷溥主编．板带材生产原理与工艺．北京：冶金工业出版社，1995
6 邹家祥主编．轧钢机械．第3版．北京：冶金工业出版社，2000
7 孙一康主编．带钢热连轧机的模型与控制．北京：冶金工业出版社，2002
8 孙一康主编．带钢冷连轧计算机控制．北京：冶金工业出版社，2002
9 陈先霖，张杰等．宽带钢热连轧机板形控制系统的开发．钢铁，2000，35（7）：28～33
10 王廷溥，齐克敏主编．金属塑性加工学——轧制理论与工艺．第2版．北京：冶金工业出版社，2001
11 林滋泉等．2001年我国轧钢行业现状及今后发展展望．中国金属学会编．提高钢材的市场竞争力——2002年全国轧钢生产技术会议暨中国金属学会第七届轧钢年会论文集．北京：冶金工业出版社，2002，1～13
12 王有铭主编．型钢生产理论与工艺．北京：冶金工业出版社，1996
13 刘战英主编．轧钢．北京：冶金工业出版社，1995
14 曲克主编．轧钢工艺学．北京：冶金工业出版社，1991
15 《小型型钢连轧生产工艺与设备》编写组编著．小型型钢连轧生产工艺与设备．北京：冶金工业出版社，1999
16 梁爱生主编．小型连轧及近终形连铸500问．北京：冶金工业出版社，1995
17 沈茂盛，李曼云等编著．型钢生产知识问答．北京：冶金工业出版社，2003
18 杨宗毅主编．实用轧钢技术手册．北京：冶金工业出版社，1995
19 李世俊等编．轧钢技术国内外情况．北京：中国金属学会，1990
20 王邦文主编．新型轧机．北京：冶金工业出版社，1994
21 《高速轧机线材生产》编写组．高速轧机线材生产．北京：冶金工业出版社，1995
22 李芳春，徐林平编著．切分轧制．北京：冶金工业出版社，1995
23 刘雅政等．有效控制产品质量的轧制技术．轧钢，2003，20（3）：19～22
24 姜振峰．切分孔型系统设计实践与分析．轧钢，2003，20（2）：69～72
25 周宏成．全连续小型棒材轧机生产线切分轧制实践．轧钢，2000，17（5）：58～60
26 高伟，王玉峰．三切分棒材轧制活套高度差与预切分轧件偏移．轧钢，2002，19（5）：9～10
27 刘美瑞．莱钢H型钢的开发研制．钢铁，2003，38（1）：29～32
28 钱健清．H型钢生产技术进展综述．马钢技术，1999（2）：10～14
29 吴结才等．我国H型钢发展现状与对策．马钢科研，1999（4）：21～27
30 杜立权．H型钢的轧制与发展．鞍钢技术，1998（4）：21～27
31 杨莉，杜虹．H型钢焊接及工艺措施．水利电力机械，2000（4）：26～29
32 孟祥杰，林文彬．H型钢生产线应用．电焊机，2001（8）：38～39
33 王先进主编．冷弯型钢生产及应用．北京：冶金工业出版社，1994
34 虞莲莲，曾正明主编．实用钢铁材料手册．北京：机械工业出版社，2001
35 姜复生，袁晓光．我国冷弯型钢生产的特点及发展．钢铁，2000，35（9）：73～77
36 王大齐．冷弯型钢的特点及应用．首钢科技，2002（5）：1～5
37 马越峰．冷弯型钢四辊轧制技术．上海金属，2003，25（1）：43～45
38 石京，王先进．国内外冷弯成型研究新进展．轧钢，1998（5）：45～48
39 卢于逑主编．热轧钢管生产问答．北京：冶金工业出版社，1991.10
40 许云祥编．钢管生产．北京：冶金工业出版社，1993.10
41 李连诗，韩观昌编著．小型无缝钢管生产（上册）．北京：冶金工业出版社，1999
42 邹家祥，施东成主编．轧钢机械理论与结构设计．北京：冶金工业出版社，1993
43 张才安编著．无缝钢管生产技术．重庆，重庆大学出版社，1997.2
44 双远华，李国祯著．钢管斜轧理论及生产过程的数值模拟．北京：冶金工业出版社，2001
45 金如崧．无缝钢管百年史话．钢管，1999，4～2003，4
46 金如崧．论无缝钢管生产的当代水平．宝钢技术，1998，2：1～7
47 周云甫．连轧管生产工艺的演变与选择．轧钢，1997，10：30～34